QUI A DÉTRUIT LA CITÉ BIBLIQUE DE HATSOR ?

MATHÉMATIQUES
Est-il vrai que 0,999 999 999... = 1 ?

PALÉONTOLOGIE
L'oiseau géant que l'on croyait carnivore

POUR LA SCIENCE

Août 2016 - n° 466 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

La turbulente histoire de la Lune

Nouvelles découvertes sur la collision Terre-Théia

M 02687 - 466 - F: 6,50 € - RD

BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF - PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,4 TND

30 ans
Cité



*MENTAL DÉSORDRE

Changez de regard sur les troubles psychiques

Exposition du 5 avril au 28 août 2016 Ⓜ Porte de la Villette



en co-production avec :





avec la collaboration de :





avec le soutien de :





en partenariat avec :















8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté d'Alice Maestracci et William Rowe-Pirra
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, assistés de Cassandra Vion
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet, assistées de Marie Chaudy
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Maud Bruguière, Roland Chapuis, Virginie Faramaz, Carlos Martin, Daniel Tacquenet, Michel Ugon

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05
PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
Pour la Science,
628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil
pourlasciencevpc@daudin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64
DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tél. : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Managing editor : Ricky Rusting. Senior editors : Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong.
President : Dean Sanderson. Executive Vice President : Michael Florek.



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Selenexit

Certains mots étant à la mode, profitons-en pour jouer avec... La nuit du 17 ou du 18 août, levez les yeux vers le ciel. Si les nuages vous le permettent, vous verrez la Lune dans toute sa splendeur. Et si vous êtes d'humeur à méditer, vous vous demanderez peut-être ce que fait là ce corps céleste qui, de concert avec l'astre du jour, rythme la vie des humains et de nombreux autres animaux depuis la nuit des temps.

À ces interrogations, les mythologies ont proposé des réponses plus ou moins farfelues et poétiques. La plutôt sympathique mythologie grecque voyait ainsi en Séléné – sœur d'Hélios et fille des Titans Hypérion et Théia – la personnification de la Lune. Pour imaginaires qu'elles soient, les légendes grecques auront au moins marqué le vocabulaire de l'astronomie. En particulier, Théia est le nom donné à une planète ancienne dont l'existence supposée vient à la rescousse des spécialistes de l'origine de la Lune.

Théia est la mère de Séléné, mais le père géologique n'est pas Hypérion

Il y a quelque 4,5 milliards d'années, lors de la naissance du Système solaire, l'hypothétique Théia aurait percuté la Terre. Et les débris éjectés par cette collision cataclysmique se seraient agglomérés en un nouveau corps : la Lune. Ce scénario d'« exit » de la matrice terrestre, les astronomes l'ont ~~voté~~ proposé dès 1974. Il résiste bien à l'examen, et même de mieux en mieux. Comme nous l'explique le planétologue Matthieu Laneuville *(voir pages 26 à 35)*, de récentes observations et analyses d'échantillons lunaires rapportés par les missions *Apollo* et *Luna* révèlent les modalités de ce « Selenexit ». Elles dévoilent aussi plusieurs épisodes de l'histoire ultérieure de notre satellite naturel – une histoire tumultueuse dont la Lune porte encore les stigmates, malgré ses airs de douce endormie. ■

sommaire

Ce numéro comporte un encart d'abonnement broché et un encart d'abonnement jeté en cahier intérieur sur la diffusion kiosque en France.
En couverture : © shutterstock.com/3DMaestro







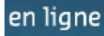


Rendez-vous






CREATIVE
AWARDS
2016
by SAXOPRINT
Grand Prix du Jury des Creative Awards 2016, un concours organisé avec le soutien de l'imprimeur
#FishForward
WWF France, SIREN n° 302518667, SAXOPRINT EURL, RCS : NANTERRE 501516645


en ligne

Actualités

Géochimie

Séquestrer de façon sûre et rapide du gaz carbonique

En Islande, CarbFix, une expérimentation pilote de séquestration du dioxyde de carbone, a montré qu'une fois ce gaz injecté dans des roches basaltiques, il se transforme définitivement en roches stables en deux années seulement.



La centrale géothermique de Hellisheidi, en Islande, a servi pour l'expérimentation pilote CarbFix. Le CO_2 est injecté dans les roches basaltiques à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

© Shutterstock.com/dalish

La séquestration géologique, c'est-à-dire le stockage de gaz dans des couches géologiques imperméables, fait partie des méthodes de lutte envisagées contre la hausse de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO_2), principal responsable du réchauffement climatique planétaire. La sûreté à moyen et long termes de cette séquestration est un enjeu industriel majeur en raison du risque de fuites accidentelles. Or l'expérimentation CarbFix en Islande, dirigée par Juerg Matter, de l'université de Southampton, en Grande-Bretagne, a permis la transformation de centaines de tonnes de CO_2 en roches carbonatées inertes en seulement deux ans.

On envisage généralement la séquestration du CO_2 dans d'anciens gisements d'hydrocarbures épuisés (des poches constituées de roches étanches) ou dans des aquifères profonds, c'est-à-dire des roches fortement poreuses qui ne communiquent pas avec les aquifères de surface constituant les nappes phréatiques. On injecte alors le gaz à haute pression, sous une forme dite supercritique. Mais dans ces conditions, le risque de relargage accidentel reste présent pendant des centaines d'années, le temps nécessaire pour que le CO_2 se minéralise, c'est-à-dire s'associe à d'autres éléments et se transforme en roches stables.

Dans le cas de l'expérience CarbFix, menée en 2012, le choix s'est porté sur une injection de CO_2 dans des roches basaltiques (issues du refroidissement rapide du magma). « Cela fait une vingtaine d'années qu'on sait que le basalte présente les caractéristiques nécessaires pour entraîner une minéralisation beaucoup plus rapide », précise Steve Peuble, chercheur au laboratoire de géologie de Lyon. Roche poreuse, ultrabasique, riche en fer, magnésium, et calcium, le basalte permet à la fois une bonne diffusion du gaz, mais aussi la réaction acido-basique qui transforme le CO_2, substance acide, en carbonates inertes et stables.

Première expérimentation menée *in situ*, CarbFix a consisté à injecter environ 220 tonnes de gaz carbonique issues d'un site industriel voisin dans du basalte entre 400 et 800 mètres de profondeur. Afin de limiter le risque de fuite vers la surface, important en raison de la fracturation naturelle de la roche et de la faible profondeur de l'expérimentation, les scientifiques ont choisi de dissoudre le gaz dans de l'eau avant l'injection. Cela permet également d'accélérer la formation des carbonates, puisque les ions métalliques issus des roches se dissolvent aussi dans cette eau injectée et réagissent ainsi plus facilement avec le gaz carbonique.

Les besoins importants en eau limitent cette séquestration

essentiellement aux sites côtiers: l'eau représentant 95 % de la masse injectée lors du processus, une centrale électrique émettant annuellement 40 000 tonnes de CO_2 nécessiterait l'équivalent de près de 800 piscines olympiques. En revanche, l'eau utilisée ne devrait pas polluer l'environnement, selon Steve Peuble: « Comme le CO_2, l'eau se retrouve piégée dans le basalte, car il est surmonté par une couche de hyaloclastites, des roches imperméables. Et en cas de remontée accidentelle, elle n'est de toute façon pas polluée par le procédé. »

Deux ans après, les mesures effectuées dans le puits principal comme dans les puits de contrôle montrent qu'au moins 95 % du gaz carbonique injecté ont été convertis en roches carbonatées, dont la stabilité se compte en centaines de milliers d'années.

Pour Steve Peuble, « la quantité exacte de CO_2 ainsi séquestrable reste à déterminer. Notamment, en précipitant, le CO_2 peut réduire petit à petit les pores de la roche et finir par boucher le puits. Et une autre réaction chimique, la serpentinisation, qui crée des sortes de filaments minéraux, peut aussi contribuer à ce phénomène. Néanmoins, l'expérience CarbFix montre d'ores et déjà qu'il est aujourd'hui envisageable d'absorber les milliers de tonnes de gaz produites chaque année par les sites industriels installés à proximité de couches basaltiques. Rien qu'en Islande, les estimations de stockage sont comprises entre 2… et 2 000 gigatonnes ».

Martin Tiano

J. M. Matter et al., Science, vol. 352, pp. 1312-1314, 2016

Archéologie

Tuerie de Parisiens néolithiques en Alsace

Mains brisées, crânes défoncés, bras coupés… À Achenheim, dans la banlieue de Strasbourg, une équipe de l'Inrap a découvert une fosse remplie de restes humains témoignant d'un épisode d'une extrême violence survenu il y a plus de 6 200 ans. Philippe Lefranc, qui a dirigé les fouilles, nous présente cette macabre découverte et la commente.

Qu'avez-vous découvert dans un silo désaffecté au milieu du village néolithique fortifié d'Achenheim ?

Philippe Lefranc: Nous avons trouvé six squelettes d'hommes polyfracturés dont les cadavres ont été jetés en vrac, accompagnés par quatre bras gauches coupés au niveau de l'humérus.

De quelle époque s'agit-il ?

Ph. L.: Les artefacts mêlés à la terre de remplissage indiquent que le dépôt date de 4400-4200 avant notre ère.

Quelle culture occupait l'Alsace à cette époque ?

Ph. L.: Le groupe de Bruebach-Oberbergen. Ce groupe est un héritier direct de la culture à céramique linéaire (5700-5000), à l'origine du courant de néolithisation danubien, avec ses maisons de bois et pisé, ses grandes nécropoles, sa céramique, ses haches polies…

Y avait-il quelque chose de particulier concernant ce groupe ?

Ph. L. : Rien, sinon qu'il traversait une période troublée. Chose unique en Alsace, le village, dont la fosse occupait d'ailleurs le centre, était entouré par une grande enceinte défensive.

Pourquoi ?

Ph. L.: On peut juste faire remarquer que le groupe de Bruebach-Oberbergen était à l'époque sur le point d'être remplacé par un autre groupe de culture danubienne venant du Bassin parisien.

Des « Parisiens » étaient-ils à la conquête de l'Alsace ?

Ph. L.: Peut-être, mais les guerres « primitives » ne sont pas de conquête. On peut juste supposer que l'arrivée d'étrangers a exacerbé les tensions, provoquant des raids entre communautés. Du reste, deux pointes de flèches ont été trouvées au contact de l'un des squelettes, ce qui suggère un combat.

Philippe Lefranc, archéologue du Néolithique à l'Inrap

Y a-t-il d'autres possibilités ?

Ph. L.: Une autre serait que l'homme en question, comme les autres captifs, ait été amené au village pour y être massacré. C'est l'interprétation qui prévaut étant donné que, comme l'a montré Fanny Chenal, qui étudie ces restes, tous les défunts ont été poignardés, ont eu le crâne éclaté, le bassin brisé, les phalanges écrasées… bref, tant de blessures pour la plupart mortelles qu'elles ne peuvent résulter que d'un déchaînement de violence en partie *post mortem*.

Donc une violence ritualisée ?

Ph. L.: Oui, c'est ce que rend vraisemblable la comparaison ethnologique avec les pratiques amérindiennes. Les Iroquois, par exemple, ramenaient des captifs pour les torturer toute une nuit avant de les exécuter. Outre ces trophées vivants, d'autres Amérindiens prélevaient des scalps ou des membres. À Achenheim, les bras gauches coupés constituent clairement des prises de trophées guerriers.

Pourquoi de tels rites ?

Ph. L.: Leur fonction, peut-on imaginer, est de terroriser l'ennemi, d'handicaper le guerrier ennemi lors de son voyage dans l'au-delà, mais aussi de renforcer l'identité du groupe en engageant chacun, du moins parmi les guerriers, dans le meurtre de l'autre. Très traditionalistes, les communautés néolithiques détestaient sans doute l'innovation et le changement, donc l'étranger qui les apportait. Comme chaque groupe faisait de même, il fallait s'allier pour survivre, ce qui se faisait par échange de femmes. Les nombreuses traces de violence que nous relevons suggèrent que la guerre était endémique. Pour tenter de préciser le sens de celle qui a eu lieu à Achenheim, nous allons analyser les gènes des défunts et tenter de déduire du strontium de leurs dents le lieu où ils ont grandi.

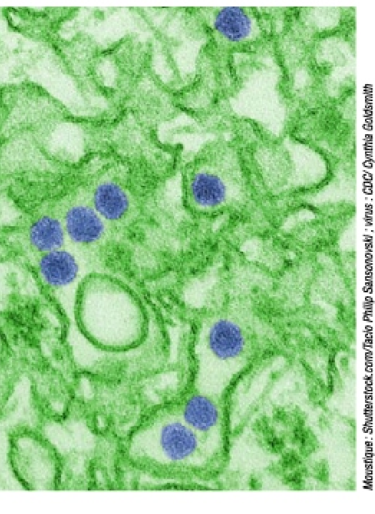
François Savatier

Médecine

Un anticorps contre Zika et la dengue

Un anticorps provenant des patients infectés par le virus de la dengue serait efficace contre le virus Zika. De quoi envisager un vaccin contre les deux maladies.





Moustique : Shutterstock.com/Tacio Philip Sansonovski ; virus : CDC/ Cynthia Goldsmith

Zika ***(à droite, en violet sur l'image en microscopie électronique à transmission)*** **est un virus du genre *Flavivirus*. Il est transmis par certains moustiques du genre *Aedes* *(ci-dessus)*.**

37

pays et territoires

sont touchés par le virus Zika, notamment le Brésil, le Mexique, le Paraguay, la Colombie, la Bolivie, les Antilles *

En février 2016, l'Organisation mondiale de la santé déclarait l'état d'urgence de santé publique à propos du virus Zika, tandis qu'on estimait à 1,5 million le nombre de personnes infectées au Brésil. À l'approche des jeux Olympiques d'été 2016 à Rio, l'inquiétude reste grande et la question d'un vaccin demeure. Cependant, il y a aussi des nouvelles encourageantes. Ainsi, avec des collègues, Félix Rey et son équipe à l'institut Pasteur, à Paris, ont mis en évidence un anticorps à la fois efficace contre Zika et contre un autre fléau des pays tropicaux : la dengue.

Le virus Zika et celui de la dengue appartiennent au genre *Flavivirus*, des virus à ARN transmis par les moustiques dans les zones tropicales. Le virus Zika a été identifié comme responsable de très nombreux cas de microcéphalies chez les fœtus et de syndromes de Guillain-Barré.

Les chercheurs ont découvert que des anticorps provenant de patients infectés par le virus de la dengue et dirigés contre un antigène du virus Zika neutralisaient ce dernier (on parle d'anticorps neutralisants).

L'équipe s'est intéressée à deux protéines structurales du virus de la dengue, prM et E, impliquées dans son processus de maturation à l'intérieur de la cellule infectée. Au cours du développement du virus, prM est découpée et perd un grand fragment. Cette étape est nécessaire pour rendre infectieuses les nouvelles particules virales : elle entraîne la réorganisation de la protéine E à la surface de l'enveloppe virale. Ce changement expose un site antigénique de la protéine E auparavant inaccessible, nommé épitope de la boucle de fusion ou FLE *(Fusion-Loop Epitope)*, qui permet la fusion du virus avec la membrane de la cellule. La protéine E est la cible principale des anticorps neutralisants, mais ces derniers sont souvent inefficaces sur ce site antigénique en raison de sa grande variabilité. Pire, ils améliorent parfois le potentiel infectieux du virus en favorisant son entrée dans la cellule.

La plupart des anticorps isolés chez les patients infectés par le virus de la dengue ciblent l'antigène FLE. Certains, toutefois, ciblent un autre site facilement accessible à la surface de la protéine E – un site stable et conservé car indispensable au bon fonctionnement du virus. Ces anticorps neutralisants à large spectre, appelés EDE pour *E-Dimer Epitope*, neutralisent efficacement le virus de la dengue.

Les chercheurs ont étudié par cristallographie la structure du complexe formé par les anticorps EDE et l'antigène, afin de déterminer le site de fixation des anticorps équivalent sur le virus Zika. Ils ont remarqué que ce site était le même pour Zika que pour la dengue.

Un vaccin contre la dengue, Dengvaxia, vient d'être autorisé dans certains pays. Fondé sur l'antigène FLE, son efficacité est relative : il serait plus efficace chez les individus ayant déjà été infectés par la dengue. Pire, il accentuerait le potentiel infectieux chez les enfants de moins de neuf ans.

Les résultats de cette nouvelle étude permettent d'envisager la fabrication d'un vaccin universel qui, en stimulant la production d'anticorps de l'antigène commun, protégerait à la fois contre Zika et contre la dengue.

William Rowe-Pirra

F. Rey et al., Nature, 23 juin 2016

* Selon un rapport de l'OMS (en date de février 2016) www.who.int/emergencies/zika-virus/zika_timeline.pdf?ua=1

Biophysique

Comment la langue du caméléon colle à sa proie

Les caméléons restent immobiles en attendant qu'une proie arrive à leur portée, puis ils projettent leur langue en une fraction de seconde. Le déploiement de la langue n'a plus de secret pour les biophysiciens, mais la capture de la proie, en revanche, restait énigmatique. La langue colle à la victime, mais par quel mécanisme? Avec ses collègues, Pascal Damman, du Laboratoire interfaces et fluides complexes de l'université de Mons, a évalué l'importance de l'un des facteurs à l'œuvre: la viscosité du mucus dont le bout de la langue est enveloppé.



Au bout de sa langue, le caméléon sécrète un mucus visqueux qui adhère à la proie et contribue notablement à sa capture. Le reptile peut atteindre une proie à une distance équivalente à deux fois sa longueur.

Les chercheurs ont mesuré cette viscosité en faisant rouler de petites billes d'acier sur une mince couche de mucus de caméléon. Le mucus se révèle 400 fois plus visqueux que la salive humaine.

Cette valeur de la viscosité a ensuite été utilisée dans un modèle dynamique d'adhésion visqueuse qui décrit le mouvement de la langue et de la proie pendant la phase de rétraction. Les chercheurs ont ainsi déterminé la taille maximale de la proie qui peut être capturée. Un caméléon d'environ 16 centimètres serait à même de capturer des oiseaux, lézards ou petits mammifères d'une taille allant jusqu'à une dizaine de centimètres. Or les proies réelles des caméléons sont toutes plus petites que les estimations du modèle, ce qui montre que l'adhésion visqueuse n'est pas un facteur limitant pour la taille des proies.

Les caméléons pourraient en théorie attraper de plus grosses proies. Pourquoi ne le font-ils pas? D'abord, un caméléon avale sa proie entière; si elle était trop grosse, il ne pourrait pas l'ingérer. Ensuite, il faut compter avec les erreurs de visée, la réaction de la proie et autres facteurs limitants du même type. Dans le monde réel, la vie des prédateurs n'est pas si facile!

Alexei Kouraev

F. Brau et al., Nature Physics, 20 juin 2016

Deuxième signal pour LIGO

En décembre 2015, l'expérience LIGO a capté un deuxième signal d'ondes gravitationnelles. Il fait suite à celui, historique, de septembre 2015.

Ces ondes ont été émises lors de la fusion d'un système binaire de deux trous noirs. L'analyse du signal a permis de déduire leurs masses: 8 et 14 fois celle du Soleil. Plus légers que ceux liés au signal de septembre 2015 (29 et 36 masses solaires), les trous noirs se sont rapprochés plus lentement, si bien que le signal enregistré est plus faible, mais plus long.

Pour les spécialistes, l'observation de deux coalescences de trous noirs en l'espace de trois mois est une confirmation que ces systèmes binaires sont nombreux dans l'Univers. Cependant, les chercheurs s'interrogent sur leur origine: s'agit-il de deux étoiles qui ont évolué ensemble et formé deux trous noirs, ou d'un trou noir qui en a capturé un autre? Les astrophysiciens pourront y répondre en accumulant de futures détections d'ondes gravitationnelles, un excellent outil d'exploration de l'Univers.

Archéologie

Angkor: un réseau urbain complexe

Angkor, capitale de l'empire Khmer entre le IXe et le XVe siècles, fait encore parler d'elle. Un relevé laser réalisé en 2012 par Damian Evans et son équipe, de l'École française d'Extrême-Orient à Paris, avait mis au jour un réseau urbain autour du grand temple d'Angkor Vat. La même équipe a effectué un nouveau relevé, de plus grande ampleur (1910 kilomètres carrés), qui dévoile la complexité et l'étendue de ce tissu urbain.

Pour mener leurs recherches dans la jungle dense du Cambodge, les chercheurs ont développé un procédé de balayage par laser aérien de télédétection. Ce système décèle les traces de constructions humaines anciennes à travers la végétation.

L'urbanisme des Khmers est mal compris, car ils utilisaient des matériaux non durables: leurs demeures et mêmes les palais royaux étaient en terre, en bois et en chaume. Seuls les temples et les systèmes de gestion des eaux étaient en pierre.

Sur le site de Sambor Prei Kuk, capitale khmère durant la période antérieure au développement d'Angkor, les archéologues ont découvert les traces d'un système hydraulique dont on pensait l'utilisation plus tardive, à l'époque d'Angkor. De plus, les nouvelles cartes montrent que la ville d'Angkor aurait été aussi vaste que l'actuelle capitale du Cambodge, Phnom Penh. À cela s'ajoute un dense réseau routier reliant les autres villes à la capitale. Tout cela montre l'importance d'Angkor dans la vie économique et sociale de l'empire khmer.

Ces résultats permettront de planifier des recherches plus précises sur les sites pour tenter de trouver des objets en céramique et d'autres matériaux datables.

W. R.-P.

D. Evans et al., Journal of Archeological Science, 13 juin 2016



Angkor Vat est le temple le mieux conservé du Cambodge médiéval. Mais il n'est que le sommet de l'immense iceberg que représente la mégapole d'Angkor.

Nouveaux éléments nommés

Nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts) et oganesson (Og) sont les nouveaux noms que les chimistes devront retenir. Les éléments superlourds 113, 115, 117 et 118 font partie du tableau de Mendeleïev depuis fin 2015, mais ce n'est que le 8 juin 2016 que l'Union internationale de chimie pure et appliquée a dévoilé les dénominations proposées par les chercheurs à l'origine de leur découverte. Il faut maintenant attendre le tampon de validation définitive, à la fin de l'année, et l'on pourra alors imprimer de nouveaux tableaux...

Encelade : mince banquise

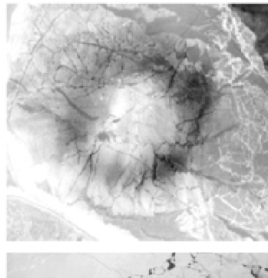
Encelade est un monde étonnant : couverte d'une couche de glace, la lune de Saturne cache un gigantesque océan d'eau liquide. À partir des données récentes de la sonde *Cassini*, Ondrej Cadek, Gabriel Tobie et leurs collègues ont proposé un modèle dans lequel la surface d'Encelade se comporterait comme une coquille élastique sur 200 mètres de profondeur. L'épaisseur de la glace serait alors de 20 kilomètres à l'équateur et seulement 5 kilomètres au pôle Sud. L'océan serait profond de 45 kilomètres et engloberait un noyau rocheux de 185 kilomètres de rayon. Il reste à expliquer pourquoi cet océan n'est pas gelé.

Succès pour LISA Pathfinder

L'environnement le plus calme mis au point par l'homme se trouve à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Au cœur du satellite LISA Pathfinder de l'ESA, les deux masses tests ont été stabilisées et ne sont soumises à aucune autre force que celle de gravité. Ce dispositif est un démonstrateur pour un observatoire spatial d'ondes gravitationnelles. La réussite de l'expérience ouvre la voie vers la seconde phase du projet, eLISA : un interféromètre à laser constitué de trois satellites formant deux bras longs de 1 million de kilomètres.

Géosciences

Les anneaux géants du lac Baïkal expliqués





Durant l'hiver, le lac Baïkal fait apparaître des anneaux d'environ six à sept kilomètres de diamètre.

© Service américain de géologie/Nasa JSC

Les anneaux géants du lac Baïkal, en Russie, intriguaient les chercheurs et le grand public depuis leur découverte en 2009. Ces structures qui peuvent mesurer jusqu'à 7 kilomètres de diamètre se forment dans la glace qui recouvre le lac durant l'hiver. La couche de glace y est plus mince, mais cela n'est visible que depuis le ciel, sous la forme d'anneaux sombres, ce qui explique leur découverte tardive. Ils apparaissent de façon imprévisible, à des endroits différents.

Avec mes collègues, j'ai analysé de nombreuses images satellitaires prises depuis 1974. Nous avons recensé 45 anneaux sur le lac Baïkal. Nous avons aussi découvert, pour la première fois, 4 anneaux sur le lac Khövsgöl en Mongolie. Pour compléter les données obtenues par les images satellitaires, notre équipe a mené des relevés sur le terrain.

Nous avons mis en évidence la présence sous la glace, au niveau des anneaux, de tourbillons chauds en forme de lentille, qui sont présents avant et pendant la période d'apparition des anneaux sur les images satellitaires. Les tourbillons tournent dans le sens des aiguilles d'une montre et la vitesse y croît du centre jusqu'aux bords. C'est ce fort courant sur les bords qui provoque la fonte de la glace et forme un anneau. Reste maintenant à comprendre quels sont les processus qui engendrent ces tourbillons.

Alexei Kouraev
LEGOS, Toulouse
Limnology and Oceanography, vol. 61(3), pp. 1001-1014, 2016

Insolite

D'anciens insectes rois du camouflage

L'évolution a doté de nombreux insectes de techniques de camouflage. Une stratégie particulièrement étonnante est celle où l'insecte se couvre de divers débris (végétaux, grains de sable, restes de proies...). Cela suppose un comportement complexe : l'insecte doit être capable de reconnaître, collecter et porter les éléments nécessaires pour parfaire son camouflage. À quand remontent de telles capacités ? Un seul exemple fossile de plus de 66 millions d'années était connu. Bo Wang, de l'Académie chinoise des sciences, et ses collègues en ont découvert plusieurs dans de l'ambre datant du Crétacé, il y a plus de 100 millions d'années. Ainsi, une larve de chrysope verte trouvée dans de l'ambre birman *(ci-dessous à gauche)* portait des trichomes (excroissances) de fougères *(à droite, vue d'artiste)*.





© Bo Wang, Nanjing

Astrophysique

L'atmosphère de Jupiter observée en profondeur

Grâce au radiotélescope *Very Large Array*, au Nouveau-Mexique, l'équipe de Imke de Pater, de l'université de Californie à Berkeley, a mesuré les ondes radio émises par l'atmosphère de Jupiter à une longueur d'onde où les nuages sont transparents, soit entre 4 et 18 gigahertz. Cette technique leur a permis d'observer la composition et les mouvements de l'atmosphère jusqu'à 100 kilomètres de profondeur dans la couche nuageuse.


© I. de Pater et al., NRAO/AUI/NSF ; NASA

La structure en profondeur de l'atmosphère de Jupiter vue en ondes radio, dans la région de la Grande tache rouge. Cette structure présente des similitudes avec celle visible en surface.

Les ondes radio émises par la planète sont partiellement absorbées dans cette longueur d'onde par l'ammoniac de l'atmosphère. Mesurer les niveaux d'absorption permet donc de déterminer la quantité de ce gaz et la profondeur à laquelle il se trouve. Cette étude met en évidence les mouvements ascendants et descendants du gaz au sein de l'atmosphère. De grandes quantités d'ammoniac s'élèvent dans les couches supérieures pour y former des nuages, tandis que les masses gazeuses pauvres en ammoniac perdent de l'altitude et s'enfoncent dans les profondeurs de l'atmosphère.

Par ailleurs, le 5 juillet dernier, la sonde *Juno* de la Nasa s'est placée en orbite autour de Jupiter. Or l'une de ses missions sera justement d'analyser la structure interne de la planète gazeuse avec une précision inédite.

W. R.-P.

Science, vol. 352, p. 1198-1201, 2016

Le petit peuple de Florès

La découverte d'un fragment de mâchoire et de dents fossiles vieux de 700 000 ans sur le site de Mata Menge, en Indonésie, éclaire les origines de l'homme de Florès, notre « petit-cousin » asiatique de l'île éponyme. Plusieurs hypothèses sur l'origine d'*Homo floresiensis* existent et divisent les paléoanthropologues. Or l'absence de fossiles suffisamment anciens empêchait d'éclaircir la question. La nouvelle trouvaille semble soutenir le scénario selon lequel ces petits hommes sont des descendants rapetissés d'*Homo erectus*. Mais cela impliquerait une évolution très rapide : seulement 300 000 ans. Certains spécialistes émettent des doutes et réclament davantage de preuves. Les recherches se poursuivent pour lever le voile sur cette énigme.

Archéologie

La première église de Nîmes

Seulement 330 mètres carrés de fouilles préventives ont suffi à révéler la plus ancienne église de Nîmes ! Le bâtiment, dont l'équipe de Marie Rochette, de l'Inrap, a mis au jour une partie, date du début du Ve siècle – soit quelques années après l'installation d'un premier évêque à Nîmes.

Sur place, rien de spectaculaire : un arc de fondation délimite une partie de l'abside remplie de sépultures. Les inhumations constituent en fait la principale moisson scientifique des fouilles, puisqu'elles documentent la transition entre les habitudes funéraires païennes et les nouveaux rites chrétiens. Si les petits défunts sont encore enterrés au sein d'amphores, les tombes d'adultes sont en caissons de bois ou de pierre, souvent des matériaux de remploi, par exemple de stèles, inscriptions, dalles, marches, caissons de plafond, tuiles en terre cuite ou en pierre, colonnes, moulures… Ces nombreux emprunts témoignent de la proximité de la nécropole du Haut Empire, où les mausolées romains, en ruine, ont été démontés.

F. S.



Cette tombe, dont l'intérieur est enduit, devait être monumentale.

© L. Wozny/Inrap

Environnement

Quand les sables bitumeux polluent l'atmosphère

L'exploitation des sables bitumeux, en pleine expansion dans le monde, représente 9 % de la production mondiale d'hydrocarbures. Montrée du doigt pour son mauvais bilan carbone et pour la pollution locale des écosystèmes, cette industrie produirait également de grandes quantités d'aérosols organiques, avec des répercussions néfastes sur la qualité de l'air et sur le climat.

C'est ce que montre une étude effectuée par John Liggio, de la division de la recherche sur la qualité de l'air du ministère canadien de l'Environnement et du Changement climatique, et ses collègues. Ces chercheurs ont établi que plus de 50 tonnes d'aérosols sont libérées chaque jour dans l'atmosphère par l'exploitation des sables bitumeux au Canada, soit une pollution égale à celle des plus grandes agglomérations du pays. Négligé jusqu'alors, l'impact sur la qualité de l'air de cette industrie doit être pris en compte pour l'évaluation des installations existantes et en projet, plaident les scientifiques.

M. T.

J. Liggio et al., Nature, vol. 534, pp. 91-94, 2016

Neurosciences

L'anorexie, nouvelle addiction ?

Laure, 18 ans, brillante élève et perfectionniste, contrôle sa nourriture. À la maison, la jeune fille cherche tous les prétextes pour ne pas se mettre à table. Elle mange de moins en moins, jusqu'au jour où elle est hospitalisée à cause de sa maigreur. Comme 1 à 3 % des filles de 13 à 25 ans, elle souffre d'anorexie mentale, la pathologie psychiatrique avec le plus fort taux de décès. Mais la recherche sur cette maladie piétine. Pourquoi ? Peut-être parce qu'elle n'est pas correctement définie, selon Philip Gorwood et ses collègues, de l'hôpital Saint-Anne à Paris.

D'après le *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*, l'anorexie mentale repose sur trois critères : une restriction alimentaire menant à la perte de poids, une perception déformée de son poids et de son corps, et une peur intense de grossir.

Les chercheurs ont testé ces critères auprès de 70 patientes. Ils leur ont montré des images de personnes maigres, de poids normal ou en surpoids, tout en évaluant leurs émotions à l'aide d'un test de « conductance cutanée » qui mesure la transpiration de la peau. Les photographies des personnes de poids normal ou en surpoids provoquaient chez les patientes la même réaction émotionnelle que chez les sujets témoins. En revanche, les images de personnes maigres déclenchaient chez les anorexiques des émotions positives. En d'autres termes, pour les patientes, la vue de la maigreur serait agréable. De plus, les jeunes malades estimaient avec justesse le poids des silhouettes qui leur étaient présentées.

Une autre étude avait déjà révélé, par IRM fonctionnelle, que le striatum des patientes regardant des images de maigreur s'activait fortement. Or cette région cérébrale profonde appartient au circuit de la récompense (qui participe au plaisir et aux addictions).

Deux des trois critères de diagnostic seraient-ils donc faux ? Pour Philip Gorwood et d'autres chercheurs, cela ne fait pas de doute. Il ne faudrait plus considérer l'anorexie comme une peur de grossir, mais plutôt comme un plaisir de maigrir. La prise en charge ne serait alors pas la même !

Laure est soignée pour son évitement phobique des aliments caloriques : on lui réapprend progressivement à accepter la nourriture. Or il est probable qu'il faudrait plutôt la « désintoxiquer ». La remédiation cognitive, qui améliore la flexibilité mentale, pourrait être efficace, ainsi que la thérapie de pleine conscience, pour retrouver le plaisir à manger.

Bénédicte Salthun-Lassalle

J. Clarke et al., Translational Psychiatry, vol. 6, e829, 2016



© Belovodchenko Anton / shutterstock.com

Actualités

Biologie cellulaire

Vieillissement cellulaire : un mécanisme élucidé

Le vieillissement cellulaire est un processus qui conduit à la mort programmée des cellules. Son rythme peut être perturbé par différents facteurs, tel le stress thermique. On soupçonnait le stress oxydant d'être un autre de ces facteurs. Michel Toledano et ses collègues, du CEA à Saclay et de l'université de Göteborg en Suède, ont montré que le stress oxydant active un mécanisme de réparation spécifique, différent de celui activé par le stress thermique, qui contribue à pallier les effets du vieillissement.

Le stress oxydant est lié à l'accumulation dans la cellule de molécules dérivant de l'oxygène. Ces substances, dont le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), endommagent les molécules du vivant, en particulier les protéines, en les oxydant, c'est-à-dire en leur prenant des électrons. Les molécules perdent leur structure normale, ce qui les rend non fonctionnelles, et s'agrègent à l'intérieur de la cellule. L'accumulation d'agrégats de protéines est une caractéristique du vieillissement cellulaire et une cause majeure des maladies neurodégénératives liées à l'âge, telle la maladie d'Alzheimer.

Toutefois, il existe des protéines dites chaperons dont la fonction est d'assurer la bonne conformation des autres protéines, d'empêcher qu'elles ne perdent leur structure ou de la réparer si elles ont été endommagées, et enfin de les éliminer lorsqu'elles ne peuvent plus être réparées. Ces protéines chaperons sont connues pour intervenir pendant un stress thermique. Elles préviennent l'agrégation des molécules ou dissolvent les agrégats.

Les chercheurs ont montré chez la levure que lors d'un stress oxydant, les protéines chaperons interviennent aussi, mais qu'elles prennent en charge les protéines dénaturées seulement en présence d'une enzyme de la famille des peroxyrédoxines. Celle-ci facilite l'établissement de la liaison entre les protéines chaperons et les protéines endommagées.

Les chercheurs ont montré que l'augmentation de la quantité de peroxyrédoxine dans les cellules allonge leur durée de vie de 50 % par rapport à celle de cellules normales.

Cette découverte permet de mieux comprendre le vieillissement cellulaire dû au stress oxydant et pourrait offrir des pistes pour lutter contre les maladies neurodégénératives.

W. R.-P.

S. Hanzén et al., Cell, vol. 166, pp. 140-151, 2016

Biologie animale

La drosophile, un fin gourmet

La meilleure façon de ne pas avoir d'intoxication alimentaire reste encore de ne pas manger d'aliments gâtés. Mais comment les éviter ? C'est ce qu'ont essayé de savoir Bassem Hassan et son équipe de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, à Paris, en étudiant la drosophile, ou mouche du vinaigre.

Les drosophiles se nourrissent d'aliments en décomposition, et qui dit aliments trop mûrs dit présence possible du colibacille *Escherichia coli*, et donc de lipopolysaccharide (LPS), une toxine présente dans la membrane de cette bactérie. Les chercheurs ont soumis les drosophiles à un choix culinaire : un fruit en décomposition sain et un autre infecté par *E. coli*. Verdict : après avoir goûté le dernier, elles évitent soigneusement d'en manger, et les femelles préfèrent l'aliment sain pour y pondre leurs œufs. Comme le LPS est un composé non volatil, les chercheurs ont supposé que cette réaction d'évitement était due à certains neurones gustatifs présents dans le tube digestif des drosophiles, connus pour détecter les substances amères. De fait, lorsqu'ils ont inhibé les récepteurs TRPA1 exprimés sur ces neurones, les mouches se nourrissaient aussi bien d'aliments contaminés que d'aliments sains, et les femelles pondaient leurs œufs aussi sur la nourriture infectée.

Ainsi, les drosophiles ont un système gustatif qui leur permet de détecter et d'éviter les toxines, et donc de se prémunir contre les infections causées par les bactéries. Par ailleurs, le fait que le récepteur TRPA1 soit présent à la fois chez les mammifères et chez les insectes montre que ce système a été préservé au cours de l'évolution, sans doute parce qu'il est indispensable pour la survie des espèces.

Alice Maestracci

A. Soldano et al., eLife, en ligne le 14 juin 2016



© Shutterstock.com/Studiotouch

La drosophile est capable de reconnaître un aliment avarié grâce à des capteurs gustatifs. Elle évite ainsi des intoxications et des sites moins favorables à la ponte des œufs.

Une planète pour trois étoiles

Un système triple d'étoiles est déjà peu commun, mais celui étudié par Kevin Wagner et ses collègues, de l'université d'Arizona, l'est encore moins. Grâce au VLT *(Very Large Telescope)*, ils ont observé directement une planète géante jovienne en orbite autour d'une seule des étoiles du système. Les deux autres, plus petites, sont sur une orbite encore plus large, ce qui rend la dynamique de ce système très atypique. Cette découverte pourrait alimenter les modèles de formation des systèmes stellaires et de leurs planètes.

D'anciennes protéines bien conservées

Presque 2 milliards d'années ! C'est l'âge des microorganismes dans lesquels Julien Alléon, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, et ses collègues ont trouvé des fragments de protéines peu dégradées. Les chercheurs ont étudié des microfossiles organiques du Précambrien dans la formation de Gunflint, en Amérique du Nord. Ils ont reconstitué la signature chimique des protéines et identifié, en particulier, des groupes amides, qui assurent la liaison entre les acides aminés. Cette découverte est exceptionnelle car les groupes amides sont relativement fragiles et s'altèrent facilement avec le temps.



ENTRETIEN

Science participative au Cern : « Il ne s'agit pas pour nous de faire une bonne action »

Faire de la physique des particules en amateur ? C'est en partie possible. Les équipes du grand laboratoire européen proposent aux volontaires de leur prêter main-forte, avec leur ordinateur ou avec leurs yeux.



Claire ADAM-BOURDARIOS, physicienne du CNRS, coordonne les actions de science participative de l'équipe ATLAS au Cern.

Recenser les espèces de coléoptères ou de batraciens présentes dans une région, découvrir une nouvelle espèce de plante et la décrire, etc. : depuis longtemps, certaines tâches ou recherches naturalistes sont l'œuvre d'amateurs passionnés qui, bien que non scientifiques par métier, ont parfois acquis une aussi bonne expertise que des chercheurs professionnels.

Depuis plusieurs années, on assiste à une participation d'un public plus large à des activités scientifiques, cette fois à l'initiative des organismes scientifiques eux-mêmes et grâce au développement d'Internet et des outils informatiques.

D'abord cantonnée aux observations naturalistes, cette « science participative » a gagné des champs tels que la recherche de signes de vie extraterrestre ou la quête de grands nombres premiers. Elle a même atteint la physique des particules, science qui exige pourtant une grande technicité expérimentale et théorique. Claire Adam-Bourdarios, physicienne membre de l'équipe ATLAS du LHC (*Large Hadron Collider*, ou Grand collisionneur de hadrons), au Cern, est responsable des actions de science participative de son équipe. Elle nous explique ici en quoi consistent ces actions et pourquoi elles sont mises en place.

POUR LA SCIENCE
Depuis quand existe-t-il des programmes de science participative au Cern ?

CLAIRE ADAM-BOURDARIOS : L'initiative est venue à l'occasion du cinquantième anniversaire du Cern, en 2004. Quelques membres de ce laboratoire européen ont alors mis en place une plateforme de « calcul volontaire » nommée LHC@home. Cette infrastructure logicielle permet à toute personne disposant d'un ordinateur et d'une connexion internet de prêter du temps de calcul au Cern. Autrement dit, le volontaire prête sa machine, à distance et aux moments où elle est inactive, afin d'effectuer des calculs utiles aux scientifiques du Cern. Le succès a été immédiat et inattendu : en 24 heures, le nombre de participants a atteint le millier, et après une semaine ils étaient plus de 7000, ce qui a saturé le serveur. L'opération, prévue pour ne durer que trois mois, a été prolongée et développée jusqu'à aujourd'hui.

PLS
De quels calculs s'agit-il ?

C. A.-B. : Au début, LHC@home faisait calculer des trajectoires d'une soixantaine de protons dans un champ magnétique, le long du tunnel du futur LHC. Ces simulations numériques (projet *SixTrack*) ont aidé à optimiser les conditions de fonctionnement du faisceau de protons du LHC, et d'ailleurs on continue à réaliser de telles simulations afin d'améliorer encore la qualité des faisceaux. Petit à petit, le champ d'application du calcul volontaire s'est étendu : simulations de divers aspects du fonctionnement de la machine LHC, puis simulations d'événements de collision proton-proton dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Ces dernières, en particulier, exigent beaucoup de mémoire. Ce n'est que depuis trois ans que l'on peut simuler avec la plateforme LHC@home un événement complet, avec les trajectoires des particules produites, leurs énergies, etc., y compris les signaux binaires au sein de chacun des détecteurs.

PLS
Quelle part ce calcul participatif représente-t-il pour le LHC ?

C. A.-B. : On estime que la puissance de calcul fournie par les participants à la plateforme LHC@home représente environ 10 % de la puissance de calcul totale utilisée par ATLAS, ce qui n'est pas négligeable. C'est, en gros, l'équivalent d'un centre de calcul d'une université de taille moyenne.

PLS

Y a-t-il d'autres programmes de science participative que LHC@home ?

C. A.-B. : Il faut d'abord préciser que LHC@home se compose de plusieurs sous-programmes ou projets, dont *SixTrack* que j'ai déjà mentionné. Il y a aussi *ATLAS@home*, rattaché à l'équipe responsable du grand détecteur ATLAS et des expériences associées, et *Test4Theory*, tourné vers les simulations en lien avec la théorie. Deux autres sous-programmes, *Beauty* (physique liée aux quarks *b*) et *CMS@home* (CMS est l'autre grand détecteur du LHC), sont en préparation.

Mis à part LHC@home, le Cern mène des actions en direction de publics plus ciblés, actions que l'on peut aussi assimiler à de la science participative. Par exemple, il a organisé quelques *Challenges* (« défis », en anglais), des concours visant à améliorer les algorithmes de traitement des signaux, avec récompenses à la clé. Ainsi, le dernier, en 2014, a porté sur des algorithmes d'apprentissage automatique pour identifier, dans les données des détecteurs, certaines désintégrations du boson de Higgs. Ces *Challenges* s'adressent plutôt à des férus d'algorithmes, qui peuvent être amenés à interagir ultérieurement avec les physiciens du Cern pour mettre en œuvre leurs idées.

Un autre aspect participatif du Cern est la mise à disposition de ses masses de données, qui permettent par exemple à des entreprises informatiques de tester leurs produits logiciels, ou qui servent à alimenter les projets éducatifs du Cern destinés aux lycéens ou étudiants et à leurs enseignants.

PLS

Combien de participants avez-vous ? Connaissez-vous leur profil ?

C. A.-B. : Actuellement, on dénombre pour *ATLAS@home* de l'ordre de 12 000 contributeurs aux calculs volontaires, qui proviennent de partout dans le monde – environ 80 pays pour les activités de ces derniers mois. Ce sont plutôt des hommes, informaticiens ou férus d'informatique. Certains sont assidus, d'autres ne participent qu'occasionnellement, en particulier les jeunes, qui sont aussi moins bien équipés en matériel informatique. Il faut aussi souligner que certains des contributeurs bénévoles ne sont pas des individus, mais des entreprises ou de petites universités : on en compte une vingtaine ou une trentaine.

PLS

La participation est-elle possible pour ceux qui ne connaissent pas la langue anglaise ?

C. A.-B. : C'est le problème : pour le moment, tout se fait en anglais – instructions, documentation, etc. C'est sans doute pourquoi les participants français, par exemple, sont relativement peu nombreux (la contribution française est au 8e rang mondial, juste derrière celle des Pays-Bas). On peut imaginer la mise en place d'un support multilingue, mais, outre la charge de travail que cela représenterait, quelles langues choisir ? Pour faciliter les choses, on pourrait aussi organiser des échanges sur Skype entre des participants et un physicien du Cern originaire du même pays qu'eux.

Du calcul volontaire, des analyses visuelles d'images de détection, des concours d'algorithmes...

PLS

Communiquez-vous avec les participants ?

C. A.-B. : Oui, nous communiquons beaucoup avec eux. Par l'intermédiaire des forums, ils posent des questions, rouspètent – en général pour qu'on leur donne plus de travail – et s'attendent à des réponses. Au début, cela nous a fait peur, parce que nous n'aurions pas pu faire face à la demande. Heureusement, les participants se sont mis à interagir et à échanger entre eux, et les plus expérimentés renseignent les débutants. Quant à les rencontrer, pourquoi pas, mais on ne sait pas trop comment faire, d'autant que beaucoup ne sont identifiés que par un pseudonyme. Peut-être *via* Skype, peut-être en leur demandant des témoignages...

PLS

Les participants bénéficient-ils d'une forme de reconnaissance ? De récompense ?

C. A.-B. : S'ils restent anonymes, on ne peut de toute façon pas faire grand-chose. La gratification n'est en aucun cas matérielle. Nous travaillons actuellement sur les images des événements simulés et interagissons beaucoup avec les volontaires qui les analysent. Un système de score mesure la part de chaque participant aux calculs partagés, mais cela est sans valeur formelle. Quant à une cosignature des publications scientifiques, ce n'est pas réaliste : celles d'ATLAS comportent déjà près de 3 000 signatures et les critères sont drastiques ! Les publications à venir remercieront donc les volontaires globalement (en outre, nous décrivons à la communauté scientifique ce qu'ils font, dans des conférences). D'ailleurs, très peu de personnes impliquées dans un programme de science participative souhaitent être citées dans les publications scientifiques : seulement 5 %, selon un sondage *Le Monde-La Recherche* publié en mai dernier. Ce même sondage montre qu'une bonne moitié d'entre elles (51 %) désirent savoir comment a été utilisé leur travail, et au Cern ce souhait est satisfait.

PLS

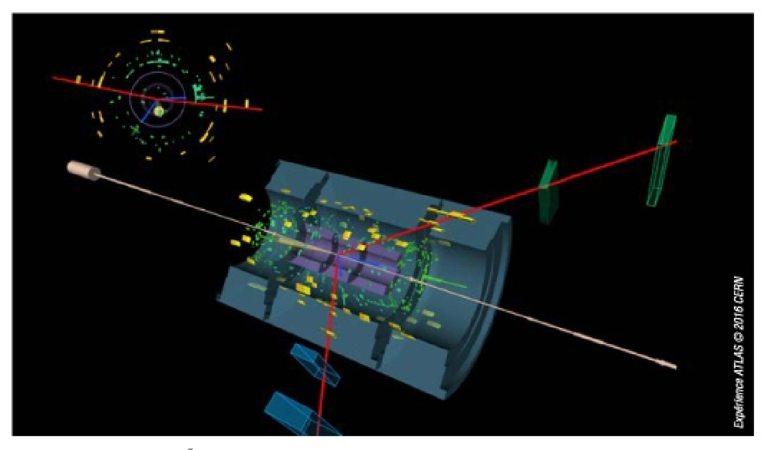
Combien de chercheurs sont impliqués dans ces programmes ?

C. A.-B. : Il faut savoir que l'initiative de tels programmes vient généralement de quelques individus dans les équipes. Chaque programme est ensuite discuté et décidé au sein de l'équipe concernée, et reçoit le soutien de la direction du Cern. L'équipe en question y affecte alors quelques personnes (généralement entre 5 et 10) qui vont y consacrer leur temps de travail. Moi, par exemple, je coordonne les projets de science participative au sein d'ATLAS pendant quatre ans, à temps plein.

PLS

Quelles sont les motivations du Cern ou des chercheurs impliqués dans la mise en place et la gestion de ces programmes ?

C. A.-B. : Pour cet organisme et ses chercheurs, il ne s'agit pas de faire une bonne action désintéressée. L'une des motivations est d'entretenir un lien avec le grand public, afin de casser les stéréotypes dont souffrent les scientifiques. Il s'agit aussi de mieux expliquer ce que nous



VISUALISATION NUMÉRIQUE D'UNE COLLISION PROTON-PROTON qui a peut-être produit un boson de Higgs. Dans cet événement, enregistré par le détecteur ATLAS du LHC le 28 septembre 2015, le boson de Higgs supposé s'est désintégré en une paire muon-antimuon *(trajectoires rouges)* et une paire électron-positron *(trajectoires bleues)*. Les programmes de science participative au Cern incluent la simulation de tels événements.

faisons, d'éduquer à la science, d'inciter les jeunes à aller vers des carrières scientifiques. Par ailleurs, les initiatives de calcul volontaire ont une réelle utilité. Outre les résultats de ces calculs partagés, l'organisation de ces derniers a permis de résoudre des problèmes informatiques, de simplifier les protocoles et les réseaux mis en jeu. Nous avons touché des férus d'informatique, qui nous ont aidés à corriger les bugs. De façon plus globale, la mise en place du calcul volontaire fournit des éléments de réflexion stratégique à la direction du Cern pour le futur informatique de ce grand laboratoire. Il y a 15 ou 20 ans, les calculs étaient assurés par un gros ordinateur ; aujourd'hui, c'est une grille (un réseau d'ordinateurs) qui est à l'œuvre ; demain, les calculs seront-ils effectués dans un *cloud*, ou par une grille d'ordinateurs encore plus puissants ? La direction est curieuse de voir comment les infrastructures de calcul partagé vont évoluer, cela pourrait lui donner des idées de solutions possibles.

SUR LE WEB

La plateforme LHC@home :
http://lhcathome.web.cern.ch/

Le programme *ATLAS@home* :
http://lhcathome.web.cern.ch/projects/atlas

Le programme *Higgs Hunters*, sur la plateforme Zooniverse :
https://www.higgshunters.org/

PLS

Comment la qualité des contributions des participants est-elle contrôlée ?

C. A.-B. : Pour ce qui est du calcul volontaire, nous nous sommes posé la question d'éventuels défauts affectant les machines des participants qui nous offrent de la puissance de calcul, défauts qui peuvent être dus à la présence de virus par exemple. Nous procédons donc à des tests. Nous confions des calculs portant sur des événements déjà étudiés, et nous vérifions la cohérence de leurs résultats. Jusqu'ici, nous n'avons pas constaté de problèmes. Un programme dont je n'ai pas encore parlé et auquel est associé ATLAS (le projet *Higgs Hunters*, sur la plateforme pluridisciplinaire Zooniverse) consiste pour le participant à examiner visuellement des images numérisées des signaux détectés afin de repérer d'éventuels événements inattendus dans le cadre du modèle standard. Pour garantir la qualité des résultats, les images sont examinées plusieurs fois, et on soumet aux participants des données réelles et des simulations, de façon à détecter des biais.

PLS

Le Cern est un organisme international ayant une grande visibilité. Le risque que certains participants soient malintentionnés est-il pris en compte ?

C. A.-B. : Oui, bien sûr. Pour ce faire, le domaine informatique des participants est bien séparé de la grille du Cern, qui n'est accessible qu'à l'aide d'un certificat. Une passerelle ou zone tampon a été installée entre les deux, de façon à éviter toute intrusion ou détérioration dans le domaine informatique du Cern.

PLS

Prévoyez-vous des développements supplémentaires de vos actions de science participative ?

C. A.-B. : Pour l'instant, nous voulons surtout stabiliser les modes de travail, consolider les procédures en cours. Pour les examens visuels d'images de détection, nous cherchons d'autres expériences qui pourraient s'y prêter. Cette activité ressemble d'ailleurs à un retour dans le passé, à l'époque où une armada de petites mains analysaient les clichés pris dans les chambres à bulles, afin d'identifier des particules et leurs trajectoires... Quant aux calculs partagés, nous envisageons la simulation d'événements exotiques rares, qui sont prévus par la théorie, afin d'apprendre à mieux les repérer. ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



La foule est-elle intelligente ?

Si l'on veut plus de démocratie participative, il faudrait d'abord déterminer dans quelles conditions un avis collectif peut être raisonnable.

Brexit ou référendum sur l'aéroport de Notre-Dame-des-Landes, l'actualité a reposé la question de la rationalité des foules. Cette interrogation, lancinante en démocratie, a traversé l'histoire des idées en commençant par Platon qui ne misait pas grand-chose sur la possibilité de s'en remettre à la sagesse du peuple (*La République*, VI, 494a).

Plus récemment, de nombreux auteurs ont réhabilité l'idée d'une sagesse des foules et ont affirmé avec insistance que l'usure de nos systèmes politiques nécessite une forme plus collaborative de démocratie. La question est complexe, car de tels dispositifs ne sont pas toujours convaincants. En témoigne l'exemple récent du mouvement Nuit debout et de ses échanges qui, de l'aveu même des enthousiastes, n'étaient pas satisfaisants.

Le problème est que l'on traite cette question sur le mode de la passion plutôt que de la raison : il faudrait être inconditionnellement en faveur de la démocratie collaborative pour être un démocrate sincère, ou y être tout à fait opposé pour ne pas prendre le risque du populisme. Pour avancer, il convient de se débarrasser des lests idéologiques, de penser une ingénierie de la décision collective et de répondre aux questions essentielles. En particulier, dans quelles conditions les conclusions d'un groupe sont-elles raisonnables et dans quelles autres non ?

Pour obtenir quelques éléments de réponse, un biologiste allemand, Jens Krause, et deux collègues ont en 2009 voulu tester cette idée de sagesse des foules dans une population humaine. Dans une première situation, on demanda à 2 057 individus d'évaluer le nombre de billes dans une jarre en contenant 562. Les individus ne se consultaient pas les uns les autres et chacun tentait d'estimer du mieux possible le bon résultat sans avoir le droit d'ouvrir la jarre. Personne ou presque ne trouva, mais la moyenne des réponses fut de 554, ce qui était une approximation remarquable de la bonne réponse.



NUIT DEBOUT : un rassemblement à Strasbourg, en avril 2016.

© Shutterstock.com/Hadrian

Ce résultat qualifie ce que l'on nomme la « sagesse des foules ». Ici, on observe que l'évaluation du groupe est de qualité supérieure à la grande majorité des appréciations individuelles. Cela n'a rien de surprenant : il suffit de considérer que tous les individus se trompent, mais que leur erreur est équirépartie. En d'autres termes, les estimations par excès des uns compensent les estimations par défaut des autres.

Dans une seconde partie de l'expérience, les chercheurs ont confronté 1 953 individus à un autre genre de problème. Il s'agissait d'estimer le nombre de fois, dans un jeu de pile ou face, où il fallait obtenir *face* à la suite pour approcher la probabilité de gagner à la loterie allemande (1 chance sur 14 millions). La bonne réponse était qu'il faut obtenir 24 fois de suite *face* (événement qui a 1 chance sur $2^{24} \approx 17$ millions de survenir). Or, cette fois, la moyenne des réponses fut de 498 – une valeur sévèrement fausse !

Ainsi, contrairement aux réponses au premier problème, les erreurs ont convergé vers un point objectivement faux. On peut donc remarquer que même dans des exemples aussi dépourvus d'enjeux idéologiques, la logique de la décision collective (ici sans délibération) peut aller à hue et à dia selon la structure du problème considéré. Dans un cas, on peut s'attendre à une dispersion des points de vue favorable à une estimation collective équilibrée, dans l'autre à une focalisation collective vers l'erreur.

Il est possible qu'une forme de collaboration élargie en démocratie soit un enjeu de rénovation politique. Mais la question doit pouvoir s'adosser à des travaux identifiant les conditions idoines de son recours plutôt qu'à des déclarations de bonnes intentions qui peuvent se révéler contreproductives pour l'intérêt général. En d'autres termes, il faut y mettre un peu moins d'idéologie et un peu plus de science. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

■ **HOMO SAPIENS INFORMATICUS** chronique de Gilles Dowek



Le dilemme moral de la voiture autonome

Programmer un robot qui sera confronté à des décisions complexes nous oblige à expliciter nos choix éthiques.

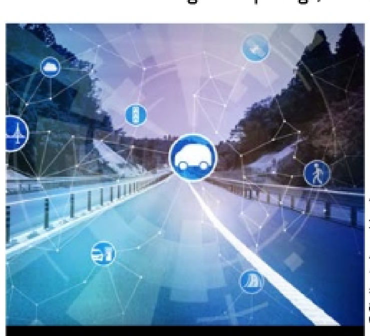
Un dilemme moral est une situation dans laquelle nous devons faire un choix qui nous mène, dans tous les cas, à commettre une mauvaise action. Par exemple, si nous devons faire le choix entre voler un médicament pour soigner un malade et ne pas aider ce dernier, nous avons deux mauvaises actions possibles : voler ou laisser souffrir le malade. Dans une telle situation, le problème qui se pose à nous n'est plus celui de faire le bon choix, mais de faire le moins mauvais.

Les réflexions sur le moins mauvais choix sont cependant parfois perçues comme un peu artificielles, car elles mènent à des conclusions difficilement utilisables en pratique.

Par exemple, imaginons qu'un groupe d'enfants traverse, sans prévenir, une route de montagne sur laquelle roule une voiture. Le conducteur n'ayant plus le temps de freiner, son choix est soit d'écraser les piétons, soit de jeter sa voiture dans le précipice. Face à un tel dilemme, s'il y a davantage de piétons sur la route que de passagers dans la voiture, le moins mauvais choix est sans doute de jeter sa voiture dans le précipice, afin d'épargner le plus grand nombre de vies possible.

Or peu de conducteurs réagissent effectivement ainsi. Et il n'est pas difficile d'expliquer cette incohérence entre leurs valeurs – qui devraient les mener à limiter le nombre de victimes de l'accident – et leurs actions : faiblesse de la volonté, prépondérance de l'instinct de survie, difficulté d'appréhender la situation dans sa globalité, brièveté du temps imparti à la décision, etc.

Toutefois, ces réflexions sont probablement moins artificielles aujourd'hui que naguère. De nombreux véhicules – ascenseurs, métros, drones, etc. – n'ont en effet plus de conducteur et d'autres – trains, avions, voitures – n'en auront plus dans un avenir plus ou moins proche. De ce fait, quand nous concevons un tel véhicule autonome *(voir l'article pages 46 à 51)*, en particulier quand nous concevons son logiciel de pilotage, nous devons décider de ce que fera ce véhicule quand il identifiera un groupe de piétons sur la route, s'il n'a plus le temps de freiner et s'il n'a d'autres possibilités que d'écraser les personnes ou de se jeter dans le précipice.



© Shutterstock.com/chombosan

SELON QUELS CRITÈRES un véhicule autonome devra-t-il prendre une décision juste avant un accident inévitable ?

Ce choix doit désormais être explicite dans le logiciel de pilotage : ici comme ailleurs, programmer un ordinateur exige d'expliciter l'implicite.

Contrairement à la situation précédente, la décision ne doit pas être prise sur le coup, mais au moment de la conception du logiciel de pilotage du véhicule, c'est-à-dire longtemps à l'avance. Nous avons donc tout le temps d'y réfléchir sereinement et il n'est plus possible d'invoquer la difficulté de décider dans le feu de l'action pour justifier une incohérence entre nos valeurs et nos actions.

En décidant de sauver les passagers de la voiture plutôt que les piétons, nous ne faisions, dans le premier cas, que commettre une mauvaise action. Dans le second, nous faisons plus : nous déclarons aussi publiquement notre intention de la commettre. Ce qui n'était qu'une incapacité de décider dans l'instant, une faiblesse de la volonté, etc., sans doute pardonnables, devient le plus froid des cynismes.

Cette obligation d'expliciter nos intentions dans les logiciels change donc complètement le rapport de la pensée éthique à l'action. Et il est possible qu'après des siècles d'incohérence entre nos belles valeurs et nos moins belles actions, l'évolution des techniques nous contraigne à les accorder. Cette explicitation nous mènera à changer nos actions, mais sans doute aussi nos valeurs. Maintenant que ces dernières nous engagent réellement, nous devrons sans doute les définir avec plus d'honnêteté.

Et une telle mise en cohérence de nos valeurs et de nos actions porte un nom : cela s'appelle un progrès moral. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

"EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS"



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.
Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.
Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.
Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limité).
Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence (en option et sous conditions ; nombre de places limité).
Les sujets abordés sont les suivants :

- Mécanique céleste et astrométrie
- Histoire de l'astronomie
- Ondes et instruments
- Le soleil
- Planétologie comparée
- Traitement de données
- Etoiles et milieu interstellaire
- Galaxies
- Cosmologie
- Observations

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 7 septembre sur le site d'inscription en ligne :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers-

contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87



UNITÉ DE FORMATION ET D'ENSEIGNEMENT
Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen 92 195 Meudon

La Lune
Une histoire pleine de surprises

Matthieu Laneuville

Comment s'est formée la Lune ? Les dernières découvertes montrent que l'histoire de notre satellite naturel est bien plus étonnante qu'on ne le pensait : intense champ magnétique primordial, volcanisme encore récent, basculement de l'axe... Le passé de notre compagnon céleste est à revoir.

L'ESSENTIEL

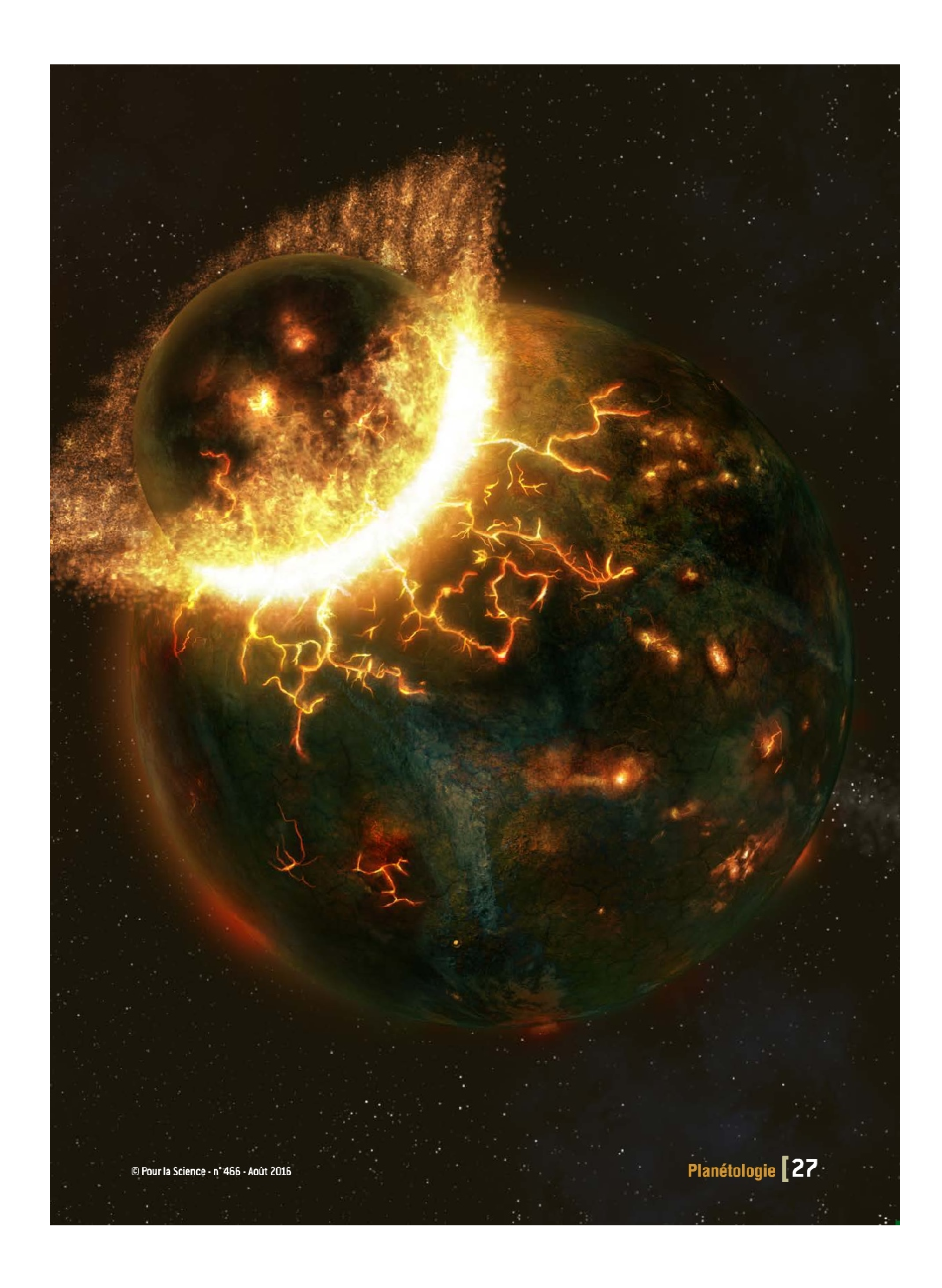
- **Selon la plupart des planétologues, la Lune est née d'une collision entre la Terre et une planète, Théia.**
- **Ce scénario doit être affiné pour rendre compte d'analyses récentes de roches lunaires et de certaines observations.**
- **Différence de composition des faces visible et cachée, existence d'un champ magnétique primordial, volcanisme récent... : autant de phénomènes que les modèles de l'origine de la Lune et de son évolution doivent expliquer.**

Dans toutes les cultures, passées ou actuelles, la Lune tient une place particulière. Sa proximité de la Terre, son cycle mensuel alternant croissants, nouvelle lune et pleine lune, ont alimenté de nombreux mythes et croyances. Elle a aussi inspiré de nombreux artistes. En 1650, dans *Histoire comique des États et Empires de la Lune*, Savinien de Cyrano de Bergerac se mettait en scène tel un voyageur partant à la rencontre des habitants de la Lune, les Sélénites. Ce nom puise son origine dans la mythologie grecque, de Séléné, la déesse et personnification de la Lune.

Les espoirs de Cyrano de Bergerac d'aller sur la Lune se sont réalisés dans les années 1960-1970 avec les missions *Apollo*, un programme aux enjeux à la fois politiques et scientifiques. Les astronautes ont rapporté de ces expéditions des centaines de kilogrammes d'échantillons lunaires *(voir la photographie page 29)*. Témoins de l'histoire géologique du satellite, ces roches ont permis aux planétologues de reconstituer les grandes étapes de la formation de la Lune. Mais ces dernières années, de nouvelles données ont montré que le passé de la Lune réservait des surprises.

Avant même de découvrir ces derniers développements, les chercheurs savaient que la Lune était un objet unique en son genre. Le rapport de sa taille et de celle de la Terre est le plus élevé parmi tous les couples planète-satellite du Système solaire et, par ailleurs, sa densité est relativement faible pour un objet de cette taille. Le Système solaire se serait formé il y a 4,6 milliards d'années lors de l'effondrement

LA LUNE SERAIT NÉE d'une collision entre la Terre primordiale, couverte d'un océan de magma, et d'une autre planète, surnommée Théia. Les découvertes récentes permettent d'affiner ce scénario.



d'un nuage moléculaire géant, qui a donné naissance au Soleil et aux planètes. Mais certaines analyses indiquent que la Lune se serait constituée 100 millions d'années plus tard. Comment expliquer ce décalage?

Le scénario privilégié est celui d'une collision entre la Terre et une planète hypothétique nommée Théia, la mère de Séléné dans la mythologie grecque. Néanmoins, les spécialistes continuent de débattre sur les différents aspects de ce modèle, et ces discussions se sont multipliées à la lumière des observations les plus récentes. Comment expliquer que la composition de la Lune et celle de la Terre soient si proches? Quels sont les processus qui ont conféré à la Lune un champ magnétique intense pendant plus de 1 milliard d'années après sa naissance? Et comment expliquer que la Lune présente un volcanisme relativement récent? Grâce à des données nouvelles ou plus précises, les chercheurs commencent à esquisser des réponses aux énigmes de l'histoire lunaire.

Le premier épisode de cette histoire est celui de l'événement qui a donné naissance à la Lune. La collision catastrophique Terre-Théia n'est pas le seul scénario ayant été envisagé. Par exemple, en 1879, George Darwin (l'un des fils de Charles Darwin) avait suggéré que le satellite s'était formé par fission de la Terre à une époque où elle tournait très vite sur elle-même, la force centrifuge ayant provoqué une éjection d'une partie du manteau dans l'espace.

La Lune exerce des forces de marée sur la Terre, qui ont tendance à ralentir le mouvement de rotation de la planète. Cela implique que par le passé, lors de la formation de la Lune, la Terre tournait beaucoup plus rapidement sur elle-même. Pour déterminer cette vitesse, il faut prendre en compte la conservation du moment cinétique, ou moment angulaire, du système Terre-Lune. Cette grandeur physique décrit l'état général de rotation d'un système et est conservée – en l'absence de perturbation extérieure, elle garde la même valeur au cours du temps. Le ralentissement de la rotation de la Terre dû aux forces de marée tendrait à diminuer le moment cinétique du système Terre-Lune, mais il est compensé par l'éloignement de la Lune.

De ce fait, la Lune aurait été plus de dix fois plus proche de la Terre à l'époque de sa formation, très probablement à une distance de l'ordre de quelques rayons terrestres, contre 60 actuellement. On en déduit que la durée d'une journée sur la Terre était d'environ cinq heures, valeur trop élevée pour que le modèle de George Darwin soit plausible.

Parmi les autres idées proposées pour expliquer la formation de la Lune, figure celle de la capture par le champ gravitationnel terrestre d'un corps formé ailleurs dans le Système solaire. Ce scénario a été en vogue jusque dans les années 1980. Cependant, les premières analyses des échantillons ramenés par les missions *Apollo* et les missions soviétiques *Luna* ont montré que la Terre et la Lune présentent une composition très proche, ce qui est difficile à expliquer si la Lune s'était formée dans une autre région du Système solaire (la composition des planètes semble très hétérogène, ne serait-ce que si l'on compare celles de la Terre et de Mars, par exemple).

Une autre possibilité serait un scénario de coaccrétion: la Terre et la Lune se seraient formées au même endroit et en même temps. Mais plusieurs arguments contredisent cette hypothèse. Même si les compositions des manteaux terrestre et lunaire sont très proches, elles présentent quelques différences, portant en particulier sur la concentration du fer. Lors de l'accrétion des débris qui ont formé un corps tel que la Terre ou la Lune, la structure interne s'est différenciée en un noyau de fer liquide et un manteau. La quantité totale de fer du corps contrôle la taille de son noyau. Or, du fait de sa faible densité, la Lune aurait un noyau plus petit, en proportion, que la Terre. Pour un modèle de coaccrétion, la taille relative des noyaux devrait être comparable. Et dans ce scénario, le moment cinétique du système Terre-Lune devrait être plus élevé qu'il ne l'est.

Le scénario de la collision Terre-Théia semble donc le plus prometteur. L'idée a été proposée en 1974 par les Américains William Hartmann et Donald Davis. Ils ont suggéré que la Lune était née de la collision de la Terre en formation avec une planète de taille comprise entre celle de la Lune et celle de Mars. Cette collision aurait vaporisé en partie les deux corps, homogénéisant leur composition. Les débris

Le scénario privilégié de la formation lunaire par une collision n'est pas exempt de défauts

■ **L'AUTEUR**



Matthieu LANEUVILLE est professeur assistant à l'Institut des sciences de la Terre et de la vie, rattaché à l'institut de technologie de Tokyo, au Japon.

ont alors formé un disque protolunaire autour de la Terre, puis ils se sont agglomérés pour former la Lune. C'est, depuis quelques décennies, le scénario privilégié par les chercheurs, car il permet d'expliquer une partie des observations que les autres scénarios échouent à expliquer. Il s'agit cependant du scénario le « moins pire » : il n'est pas exempt de défauts.

À partir des années 1980, des planétologues ont simulé numériquement des collisions et ont confirmé que la Lune a pu se former ainsi. Les contraintes de ces modèles étaient principalement l'obtention du bon moment cinétique et de la bonne masse finale pour la Terre et la Lune. Ces exigences étaient satisfaites en considérant une collision oblique avec une masse pour Théia de l'ordre de celle de la planète Mars. Cependant, selon ces simulations, Théia contribuait pour 10 % à la masse de la Terre et pour 70 à 90 % à la masse de la Lune. Ces conditions ne permettaient pas aux matériaux des deux corps de bien se mélanger et il n'était donc pas possible d'expliquer l'extraordinaire similitude de composition de la Terre et de la Lune.

Les premières analyses comparées du manteau terrestre et du manteau lunaire, en particulier de l'oxygène et de ses différents isotopes, laissaient malgré tout planer le doute. Elles indiquaient une composition proche, mais les incertitudes étaient assez importantes. Or, depuis une dizaine d'années, les mesures ont gagné en précision et ont été effectuées sur des éléments de plus en plus nombreux. Elles ont confirmé cette similitude de composition, d'où une « crise isotopique ».

Comment résoudre cette crise ? Plusieurs hypothèses ont été esquissées pour concilier les observations et les simulations. Si l'hétérogénéité du Système solaire est plus limitée que prévu, l'impacteur pourrait avoir une composition assez proche de celle de la Terre. En outre, des simulations montrent qu'un objet de composition légèrement différente peut intervenir dans la formation de la Lune sans toutefois entraîner de variations détectables dans les concentrations isotopiques finales. Dans les années à venir, les chercheurs espèrent obtenir des données supplémentaires sur la composition de divers corps du Système solaire (comètes, astéroïdes, Vénus, Mercure...) qui amélioreront la vision de l'histoire des éléments et de leur répartition.

Pour résoudre la « crise isotopique », une autre possibilité serait que la Lune se soit formée principalement à partir du manteau terrestre et non de l'impacteur. Cela implique de réviser les conditions dans lesquelles se déroule le scénario d'impact.


NASA/Johnson Space Center photograph S73-19456

CET ÉCHANTILLON DE ROCHE LUNAIRE, rapporté par la mission *Apollo 17* en 1972, a permis de montrer que la Lune présentait un champ magnétique intense il y a 4,2 milliards d'années. Par ailleurs, les roches lunaires indiquent que la Lune et la Terre présentent des compositions très similaires.

Un impact plus violent que prévu

Une piste prometteuse a été proposée en 2012 : Matija Cuk, de l'institut SETI, et Sarah Stewart, alors à l'université Harvard, ont proposé un mécanisme qui provoque une diminution progressive du moment cinétique du système Terre-Lune par des effets de résonance gravitationnels entre l'orbite de la Terre autour du Soleil et celle de la Lune autour de la Terre. Grâce à ce mécanisme, la contrainte de la conservation du moment cinétique dans les simulations est moins sévère et autorise des impacts plus violents, dont il résulte un moment cinétique initial plus important. Une nouvelle génération de modèles a donc été proposée. Ces modèles incluent la possibilité d'un impact frontal par un objet de la taille de la Terre ou d'un impact oblique entre un corps de petite taille et la Terre qui tournait très vite sur elle-même.

La conséquence de ces nouveaux modèles est que le nuage de débris à partir duquel la Lune se forme provient désormais surtout du manteau terrestre, ce qui expliquerait la similitude de composition des deux corps tout en justifiant la quantité relativement faible de fer dans l'intérieur de la Lune. En effet, le fer du noyau terrestre serait trop profond pour se mélanger lors de la collision.

Pour être complet, certains modèles proposent que la composition du disque de débris de la collision, le disque protolunaire, diffère de celle de la Terre, mais certains processus d'interaction du disque avec l'océan de magma terrestre, formé à la suite de l'impact, tendent à homogénéiser la composition des deux corps, en particulier celle des isotopes d'oxygène. Dans ce cas, l'homogénéisation se fait *a posteriori*, après la collision avec Théia.

L'analyse isotopique ne se limite pas à l'oxygène. Par exemple, le couple d'éléments hafnium-tungstène donne des informations sur la date de la collision. L'hafnium 182, instable, se désintègre en tungstène 182 avec une demi-vie de 8,9 millions d'années. L'affinité de ces éléments avec le fer permet de les utiliser comme traceurs de la formation des noyaux terrestre et lunaire. Comme il est peu probable que la composition isotopique des deux manteaux évolue de façon indépendante vers la même valeur, leur comparaison donne des informations sur l'origine des matériaux qui composent les deux corps.

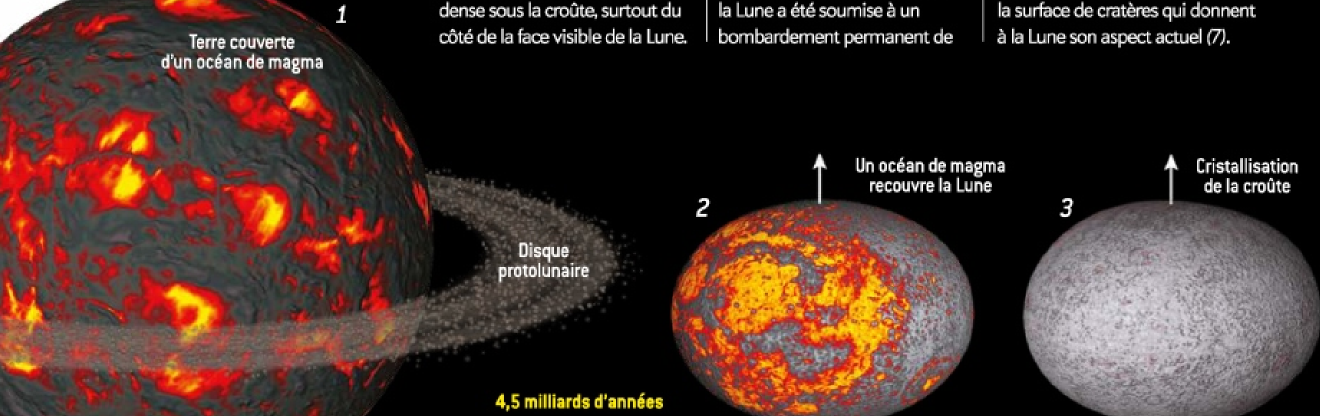
Or, en 2015, Mathieu Touboul, alors à l'université du Maryland, et ses collègues ont montré que, contrairement à ce que l'on pensait jusque-là, la Lune et la Terre présentent une différence en composition isotopique. Sa faible valeur suggère que cette différence provient de processus postérieurs à la formation de la Lune. Une étude approfondie

L'HISTOIRE GÉOLOGIQUE DE LA LUNE

La Lune se serait formée à la suite d'une collision entre la Terre, couverte d'un océan de magma, et un corps d'une taille comprise entre celle de la Lune et de Mars.

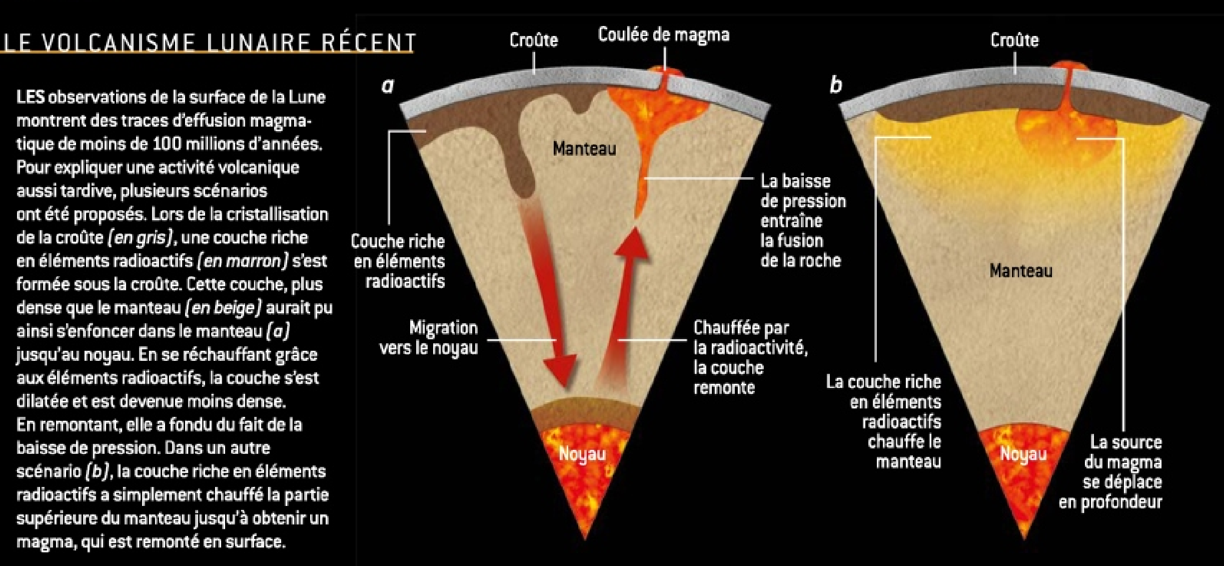
Les débris auraient formé un disque autour de la Terre *(1)*, puis se seraient agglomérés pour constituer la Lune à une distance de 3 à 5 fois le rayon de la Terre. Les effets de marée ont ralenti la rotation de la Terre sur elle-même et ont conduit la Lune à s'éloigner progressivement jusqu'à atteindre aujourd'hui une distance de 60 rayons terrestres. Quand la Lune s'est formée, sa surface était couverte d'un océan de magma de quelques centaines de kilomètres de profondeur *(2)*. Celui-ci s'est refroidi et a cristallisé *(3)*. Divers éléments, dont des éléments radioactifs tels que le potassium, ont une préférence pour la phase liquide du magma et ont donc formé une couche dense sous la croûte, surtout du côté de la face visible de la Lune. Divers mécanismes ont été proposés pour expliquer cette distribution asymétrique *(voir ci-contre)*. Cette couche riche en éléments radioactifs serait aussi liée à un volcanisme tardif *(voir ci-dessous, à gauche)*. En outre, divers indices suggèrent que la Lune présentait un champ magnétique intense lors de sa formation *(voir ci-dessous, à droite)*. Tous ces phénomènes appellent à une meilleure compréhension de la structure interne de la Lune.

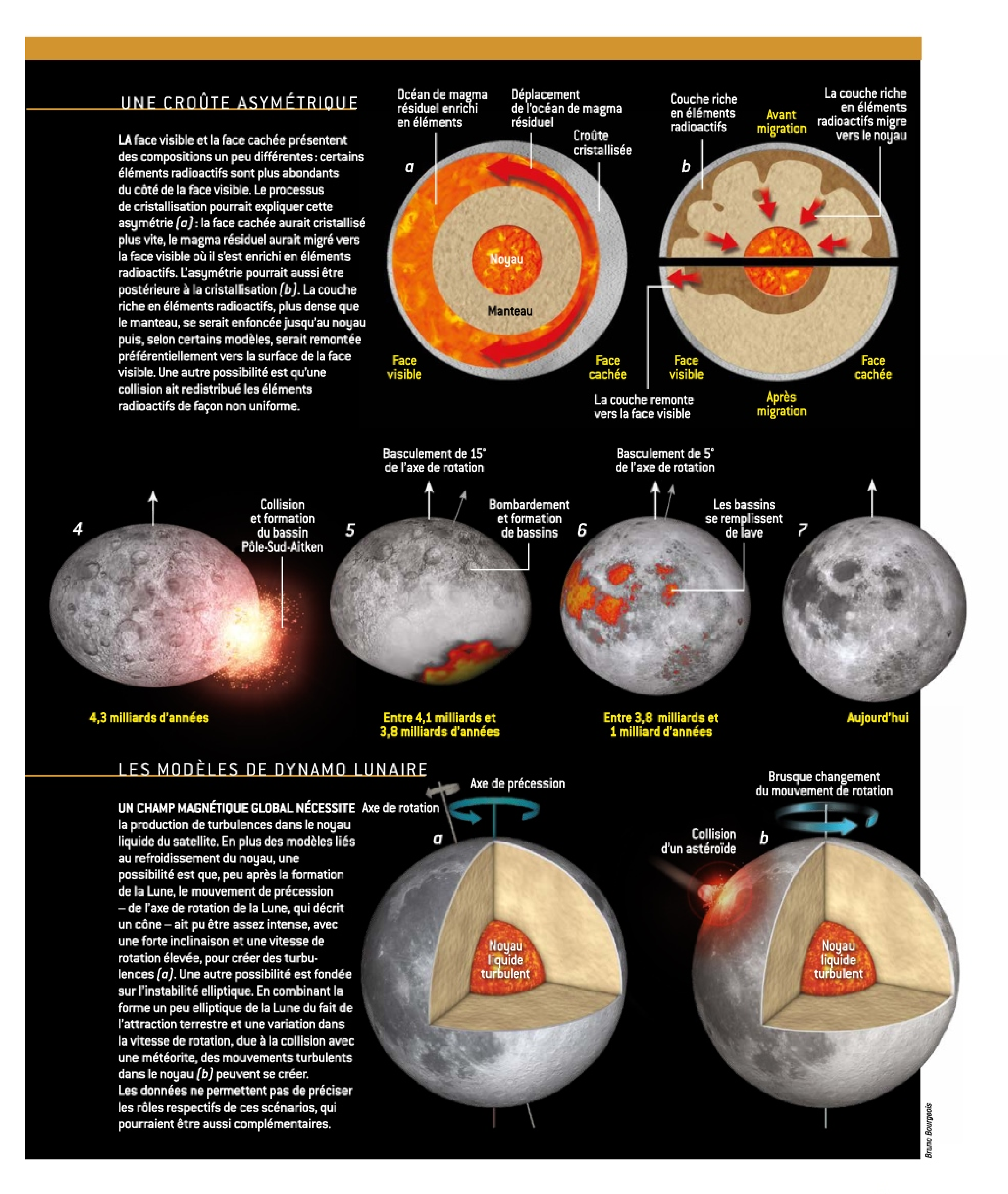
Tout au long de son histoire, la Lune a été soumise à un bombardement permanent de météorites, avec certains événements notables comme la formation des bassins, de vastes dépressions dans la croûte. L'impact qui a donné naissance au bassin Pôle-Sud-Aitken *(4)* a aussi fait basculer l'axe de rotation de la Lune de 15 degrés *(5)*. Le manteau sous les bassins a fondu et les a remplis de basalte, créant les mers lunaires sombres *(6)*. La formation de la mer Procellarum a également provoqué un basculement de l'axe de rotation de 5 degrés. Enfin, les bombardements récents ont constellé la surface de cratères qui donnent à la Lune son aspect actuel *(7)*.



LE VOLCANISME LUNAIRE RÉCENT

LES observations de la surface de la Lune montrent des traces d'effusion magmatique de moins de 100 millions d'années. Pour expliquer une activité volcanique aussi tardive, plusieurs scénarios ont été proposés. Lors de la cristallisation de la croûte *(en gris)*, une couche riche en éléments radioactifs *(en marron)* s'est formée sous la croûte. Cette couche, plus dense que le manteau *(en beige)* aurait pu ainsi s'enfoncer dans le manteau *(a)* jusqu'au noyau. En se réchauffant grâce aux éléments radioactifs, la couche s'est dilatée et est devenue moins dense. En remontant, elle a fondu du fait de la baisse de pression. Dans un autre scénario *(b)*, la couche riche en éléments radioactifs a simplement chauffé la partie supérieure du manteau jusqu'à obtenir un magma, qui est remonté en surface.





UNE CROÛTE ASYMÉTRIQUE

LA face visible et la face cachée présentent des compositions un peu différentes : certains éléments radioactifs sont plus abondants du côté de la face visible. Le processus de cristallisation pourrait expliquer cette asymétrie *(a)* : la face cachée aurait cristallisé plus vite, le magma résiduel aurait migré vers la face visible où il s'est enrichi en éléments radioactifs. L'asymétrie pourrait aussi être postérieure à la cristallisation *(b)*. La couche riche en éléments radioactifs, plus dense que le manteau, se serait enfoncée jusqu'au noyau puis, selon certains modèles, serait remontée préférentiellement vers la surface de la face visible. Une autre possibilité est qu'une collision ait redistribué les éléments radioactifs de façon non uniforme.

LES MODÈLES DE DYNAMO LUNAIRE

UN CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL NÉCESSITE la production de turbulences dans le noyau liquide du satellite. En plus des modèles liés au refroidissement du noyau, une possibilité est que, peu après la formation de la Lune, le mouvement de précession – de l'axe de rotation de la Lune, qui décrit un cône – ait pu être assez intense, avec une forte inclinaison et une vitesse de rotation élevée, pour créer des turbulences *(a)*. Une autre possibilité est fondée sur l'instabilité elliptique. En combinant la forme un peu elliptique de la Lune du fait de l'attraction terrestre et une variation dans la vitesse de rotation, due à la collision avec une météorite, des mouvements turbulents dans le noyau *(b)* peuvent se créer.
Les données ne permettent pas de préciser les rôles respectifs de ces scénarios, qui pourraient être aussi complémentaires.

permettra de mieux comprendre la relation entre la proto-Terre, Théia et leur collision.

Ainsi, les observations semblent converger vers le scénario de la collision. Les planétologues savent expliquer la composition similaire de la Terre et de la Lune et le moment cinétique du système même si certains détails restent à clarifier. Cependant, l'étape suivante de l'histoire lunaire soulève ses propres questions.

En s'accrétant, les débris de la collision ont libéré de grandes quantités d'énergie, par conversion de l'énergie potentielle gravitationnelle en chaleur. Une partie du matériau lunaire a fondu en un océan de magma global de quelques centaines de kilomètres de profondeur qui a recouvert toute la surface du satellite. En se refroidissant, le magma a rapidement cristallisé en une croûte, composée principalement d'anorthosite (une roche magmatique riche en feldspaths, dont sont constituées les zones les plus claires de la surface lunaire).

Le modèle le plus simple décrivant ce processus consiste à supposer que la cristallisation est homogène sur toute la surface du globe. Les propriétés de la croûte devraient alors être partout les mêmes. Il n'en est rien : les planétologues notent une grande disparité de ces propriétés, avec une répartition asymétrique entre la face visible et la face cachée. Par exemple, les éléments dits incompatibles – qui ont tendance à rester dans la partie liquide du magma lors de la cristallisation et donc à s'accumuler sous la croûte – sont présents en plus grande concentration sur la face visible.

Une face cachée très différente

Les observations effectuées par la mission japonaise *Kaguya* (aussi nommée *Selene*) confirment cette tendance. Elles montrent en particulier que le rapport de concentration du magnésium et du fer est plus élevé sur la face cachée que sur la face visible. Le fer, étant un élément incompatible, aura eu tendance à être moins présent dans les premières roches à cristalliser de l'océan de magma. Cette observation suggère, par exemple, que la croûte de la face cachée a cristallisé plus tôt que la face visible. Le magma résiduel aurait alors migré vers l'hémisphère de la face visible *(voir la figure page 31)*, où il se serait davantage enrichi en éléments radioactifs que sur la face cachée. Ce n'est pas la seule façon d'expliquer ce phénomène, mais il est certain que le modèle simple de formation de la croûte doit être révisé.

SUR LE WEB

La mission LRO, *Lunar Reconnaissance Orbiter*, de la Nasa, a effectué une cartographie précise de certaines régions de la surface lunaire. Les membres de l'équipe ont réalisé une **vidéo qui résume l'histoire de la Lune :** http://bit.ly/pls466_Lune1 et une **visite guidée de la surface du satellite :** http://bit.ly/pls466_Lune2

De l'eau sur la Lune

Longtemps jugée appauvrie en éléments volatils, la Lune semble en fait contenir une quantité non négligeable d'eau dans son manteau. Son étude permettrait de mieux comprendre comment l'eau est arrivée sur Terre.

En 2008, Alberto Saal, de l'université Brown, aux États-Unis, et ses collègues ont montré grâce à de nouvelles techniques d'analyse que de l'eau était présente dans des échantillons lunaires que l'on pensait déshydratés. Il est possible de relier ces observations à la quantité d'eau présente dans le manteau et dans le magma initial qui aurait contenu de l'eau à des concentrations de l'ordre de 100 parties par million.

Par ailleurs, l'eau est aussi présente à la surface du satellite. Des observations de la surface lunaire montrent que de la glace est stable sur des temps géologiques dans les zones d'ombre permanente près des pôles. La stabilité de ces glaces a permis de préciser certains points de l'histoire lunaire, comme l'évolution de son orbite et le basculement de son axe de rotation.

La présence d'eau dans le manteau a une forte influence sur la dynamique des roches mantelliques et donc sur les scénarios qui décrivent les phénomènes de champ magnétique primordial et de volcanisme découverts récemment sur la Lune. En effet, l'eau réduit la viscosité des roches et rend la convection, et donc le refroidissement, plus efficaces. En présence d'eau, il est ainsi difficile d'expliquer comment la Lune a maintenu une activité volcanique et magnétique pendant de longues périodes. L'étude de ces conséquences sur la Lune est encore récente et les modèles futurs devront intégrer cette nouvelle donnée.

L'importance de l'eau s'étend au scénario de formation de la Lune. Les modèles actuels montrent que la formation de la Lune par accrétion à partir d'un disque de débris créé par un impact géant aura tendance à produire une Lune appauvrie en éléments volatils, tel l'hydrogène dont l'eau est composée. Les observations récentes permettront donc de poser des contraintes plus fortes sur le processus de formation, et donc potentiellement sur l'état initial de la Terre.

Ainsi, la question de l'origine de l'eau lunaire (présente dès la formation ou issue d'un apport externe après l'accrétion) est encore ouverte. Elle est cruciale, car elle permet aussi de comprendre l'origine de l'eau terrestre. En effet, cette eau est-elle le fruit d'un processus rare (où l'apport de la majorité de l'eau se serait fait lors de la collision de quelques corps riches en eau pendant la formation de la Terre), ou la présence d'eau est-elle très commune ? Et peut-on s'attendre à en voir fréquemment dans la composition d'exoplanètes, ces planètes en orbite autour d'autres étoiles et que l'on étudie de plus en plus ?

Une autre explication suppose que la cristallisation est symétrique, mais qu'une réorganisation de la structure interne de la Lune a enrichi la face visible en éléments incompatibles. Ceux-ci auraient d'abord formé, de façon globale, une couche dense entre la croûte et le manteau. Sous l'effet d'instabilités hydrodynamiques, cette couche aurait coulé dans le manteau en direction du noyau. Les éléments radioactifs qu'elle contenait l'auraient alors réchauffée, donc dilatée, sa densité aurait diminué et elle serait remontée vers la surface. Des simulations numériques montrent que la migration n'est pas forcément symétrique et que la couche d'éléments incompatibles remonte surtout vers la face visible. Nous verrons plus loin que ce mécanisme joue aussi un rôle dans le volcanisme tardif de la Lune.

L'asymétrie de la croûte pourrait aussi avoir une origine externe. Elle pourrait être le résultat, par exemple, d'un impact géant qui aurait changé la composition du manteau d'un hémisphère, mais pas de l'autre. Pour répondre à la question de l'origine de l'asymétrie, les planétologues attendent beaucoup d'une mission lunaire où un module se poserait sur la face cachée et en ramènerait des échantillons.

Basculements de l'axe

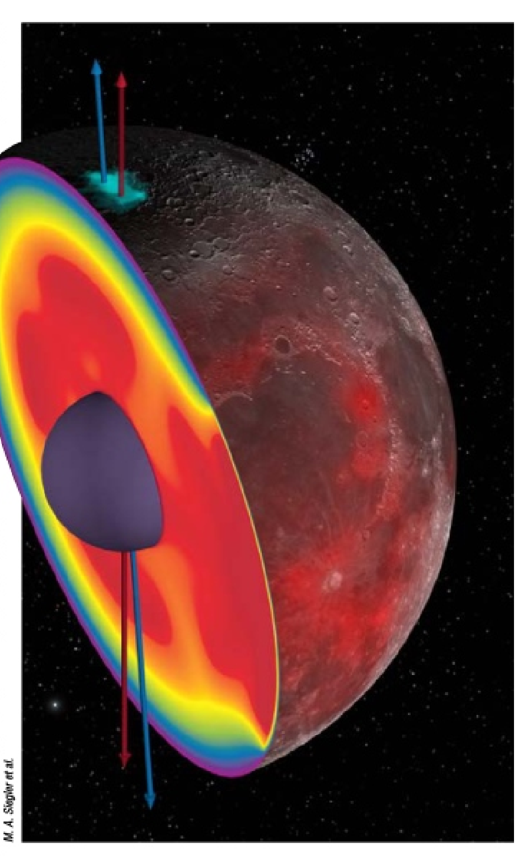
Après la formation de la croûte, il y a environ 4,3 milliards d'années, la Lune ne ressemblait pas encore à l'image que nous en avons aujourd'hui. En effet, depuis, notre satellite a été continuellement bombardé par des météorites qui ont constellé sa surface de cratères. Un événement remarquable est la collision avec une météorite qui a formé le bassin Pôle-Sud-Aitken (c'est le plus grand cratère d'impact connu du Système solaire). À la suite de cette collision, l'axe de rotation de la Lune aurait basculé de 15 degrés.

Ensuite, il y a entre 4,1 milliards et 3,9 milliards d'années, les planètes telluriques du Système solaire ont probablement connu une période de bombardement particulièrement intense. Cet épisode pourrait être dû à la perturbation d'un réservoir d'astéroïdes qui a envoyé les petits corps vers la partie interne du Système solaire. Selon les modèles récents de formation du Système solaire (« modèle de Nice » et « hypothèse du Grand Tack »), une modification de l'orbite des planètes Jupiter et Saturne serait à l'origine de ce « grand bombardement tardif ». La Lune n'aurait pas échappé au phénomène et des météorites ont creusé de vastes bassins dans la croûte lunaire. Ces bassins se sont ensuite remplis de lave basaltique qui, en refroidissant, a formé une partie des zones sombres de la Lune, nommées aujourd'hui mers lunaires ou *maria*.

En 2016, avec plusieurs collègues, nous avons montré que l'axe de rotation de la Lune s'est aussi déplacé à cause de son évolution interne *(voir la figure ci-contre)*. Nous avons constaté l'existence de deux régions riches en hydrogène, indicatif de la présence de glace d'eau, aux antipodes l'une de l'autre, mais à 5 degrés des pôles actuels. Ces régions ont donc probablement été les pôles il y a plusieurs milliards d'années. La réorganisation de la structure interne de la Lune à l'origine de la formation de la région Procellarum, une mer de basalte, et le changement associé de la répartition des masses aurait conduit au basculement de l'axe de rotation lunaire.

À ce stade de son histoire, la Lune ressemble au satellite que nous connaissons. Pourtant, si les planétologues commencent à avoir une bonne vision des grandes étapes géologiques de la Lune, ce satellite continue de nous surprendre, notamment avec la découverte qu'il était doté, dans le passé, d'un puissant champ magnétique. Ce n'est plus le cas aujourd'hui et seul un champ rémanent, figé dans certaines roches, subsiste. Il a été mesuré en 1998 par la sonde *Lunar Prospector* puis, plus récemment, par *Kaguya*. Mais ce champ résiduel est un indice en faveur d'un champ global actif par le passé. Cette idée est renforcée par l'analyse récente d'échantillons par des techniques de haute précision.

La présence ou non d'un champ magnétique important sur une planète ou un satellite nous renseigne sur son fonctionnement interne et, par conséquent, sur son histoire géologique. Les champs magnétiques planétaires résultent du mouvement d'un liquide conducteur, généralement du fer dans le noyau – induisant un « effet dynamo ». Ce mouvement peut être dû aux processus de refroidissement : de manière directe, il s'agit de convection dite thermique, ou indirecte, grâce à des forces de poussée liées à la cristallisation du noyau interne solide. Une autre possibilité est une activation mécanique du mouvement, due à un brusque changement de la direction de l'axe de rotation du manteau par rapport à


M. A. Siegler et al.

LA LUNE A BASCULÉ plusieurs fois au cours de son histoire. Lors de la formation de la mer de basalte Procellarum, l'axe de rotation a basculé de 5 degrés entre l'axe initial *(en bleu)* et l'axe actuel *(en rouge)*.

celui du noyau, ce qui produit une rotation différentielle. En outre, certains impacts majeurs au commencement de l'histoire lunaire pourraient avoir eu un effet similaire *(voir les figures pages 30-31)*.

Les dynamos d'origine mécanique sont encore assez peu étudiées, mais les changements de paramètres orbitaux nécessaires à leur fonctionnement ne permettent pas d'expliquer l'existence d'un champ magnétique durant plus de 1 milliard à 2 milliards d'années. Il faut donc recourir à des dynamos liées au refroidissement et à la cristallisation de la graine, la partie solide du noyau, pour expliquer l'existence d'un champ magnétique persistant. Le champ terrestre, par exemple, dépend principalement de la cristallisation de la graine. L'existence d'un champ magnétique sur la Lune il y a environ 4 milliards d'années peut s'expliquer par le refroidissement initial du satellite, mais l'amplitude de ce champ et sa persistance pendant une période prolongée sont difficiles à expliquer ainsi, du fait de la petite taille de la Lune.

En 2009, Ian Garrick-Bethell, de l'université de Californie à Santa Cruz, a examiné des échantillons rapportés des missions *Apollo* à l'aide de techniques plus sensibles que lors des analyses précédentes. Il a montré l'existence d'un champ supérieur à 1 microtesla il y a 4,2 milliards d'années. En effet, lorsque de la roche fondue se refroidit, les moments magnétiques des atomes s'alignent sur le champ magnétique global. Ce dernier imprime alors sa trace dans la roche sous la forme d'un champ rémanent. Le champ global aurait donc perduré quelques centaines de millions d'années et son amplitude a varié par au moins deux ordres de grandeur (entre 1 et 100 microteslas ; il est d'environ 50 microteslas sur Terre). Selon certains scénarios, ce champ pourrait même avoir persisté 2 milliards d'années supplémentaires, mais les roches lunaires enregistrent assez mal le champ magnétique et les valeurs de champ attendues par ces scénarios sont trop proches du seuil de sensibilité des dispositifs expérimentaux pour être détectés.

Une dynamo lunaire d'origine inconnue

Le champ magnétique lunaire aurait ainsi connu une période ancienne, mais brève, où il avait une forte amplitude, suivie d'une période potentiellement longue associée à une faible amplitude. Comment concilier la durée, l'amplitude et l'extrême variabilité d'un tel champ avec les modèles d'évolution interne de la Lune ?

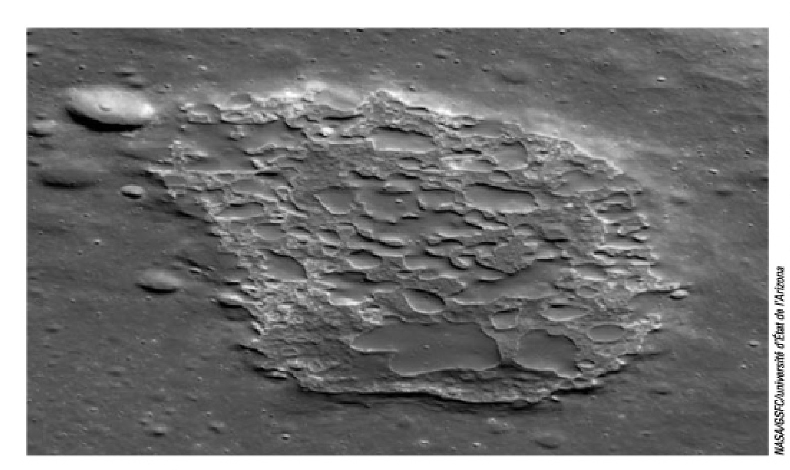
La prise en compte de la présence d'eau dans le manteau *(voir l'encadré page 32)*, de la croissance d'une graine, de l'entraînement mécanique dû à des variations orbitales ou d'une collision avec un astéroïde ont permis d'expliquer certaines observations, mais aucun de ces phénomènes ne donne naissance à un champ de longue durée. De plus, la question de l'amplitude reste ouverte. L'intensité du champ magnétique à la surface dépend directement de la taille du noyau qui engendre ce champ. Or le champ lunaire ancien semble être aussi important que le champ magnétique terrestre aujourd'hui, bien que le noyau lunaire soit probablement dix fois plus petit que celui de la Terre relativement à sa taille.

L'histoire complète du champ magnétique lunaire est encore loin d'être écrite. Une meilleure compréhension de la structure interne et de l'évolution du manteau fournira des contraintes plus sévères sur les modèles. Une meilleure couverture temporelle des données, avec notamment la détermination de la période où la dynamo s'est arrêtée, sera aussi un grand atout pour concevoir un modèle cohérent.

Un autre aspect des sciences lunaires qui doit être repensé du fait d'observations récentes est celui de l'activité magmatique. En 2014, grâce aux images de haute résolution obtenues par la mission LRO *(Lunar Reconnaissance Orbiter)*, Sarah Braden, de l'université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont rapporté la découverte de près de 70 anomalies topographiques ressemblant très fortement à des structures volcaniques avec des coulées de lave *(voir la figure ci-dessous)*. Les astronomes se sont fondés sur le nombre de cratères de météorites qui recouvrent ces régions pour dater les volcans : leur faible nombre suggère que ces formations volcaniques sont très récentes, âgées de moins de 100 millions d'années. Si cela est confirmé, il faudra comprendre par quels mécanismes la chaleur des volcans est produite. En effet, la plupart des modèles actuels expliquent seulement une activité volcanique qui aurait plus de 1 milliard d'années.

Parmi les pistes alternatives qui restituent correctement la durée du volcanisme lunaire et sa distribution à la surface du satellite, deux scénarios sont fondés sur la constatation que l'activité volcanique lunaire est fortement corrélée avec une région de la face visible, Procellarum KREEP Terrane, qui est riche en éléments radioactifs (KREEP est un acronyme précisant les éléments en questions : le potassium, K, les terres rares, REE – pour *Rare Earth Elements* en anglais –, et le phosphore, P). Les deux modèles se distinguent par leur interprétation de l'enrichissement en éléments radioactifs de la région : sont-ils la cause ou la conséquence de l'activité volcanique ?

Les éléments radioactifs sont aussi des éléments incompatibles dont nous avons parlé précédemment et qui restent dans l'océan de magma résiduel lors de la cristallisation. Après refroidissement, ils se sont accumulés dans une couche plus dense que

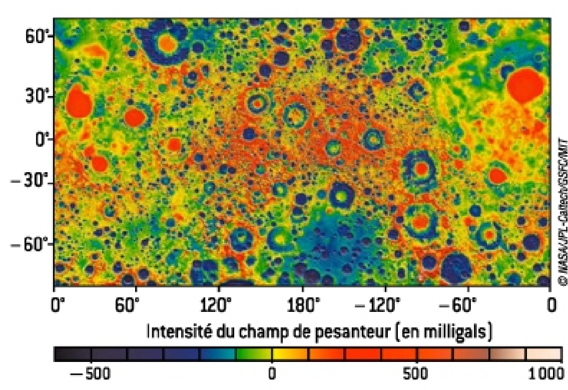


NASA/GSFC/université d'État de l'Arizona

INA EST UNE COULÉE DE LAVE BASALTIQUE de deux kilomètres de large, photographiée pour la première fois lors de la mission *Apollo 15*. Son âge était estimé à moins de 100 millions d'années, mais son caractère unique faisait penser à une anomalie. La sonde LRO a, depuis, découvert 70 épanchements de lave similaires : la Lune a eu une activité volcanique récente !

DES SONDES JUMELLES POUR AUSCULTER LA CROÛTE LUNAIRE

En 2012, la Nasa a envoyé les deux sondes jumelles de la mission GRAIL (pour *Gravity Recovery And Interior Laboratory*) en orbite autour de la Lune. En mesurant les variations de distance entre les deux sondes qui suivaient la même trajectoire, les chercheurs ont obtenu une cartographie très précise du champ de gravité lunaire. En couplant ces observations à des mesures topographiques, les planétologues ont amélioré leur connaissance de la croûte de la Lune. Les propriétés globales de la croûte sont le résultat direct du processus de cristallisation de l'océan de magma, et donc de la composition globale de la Lune. La précision inégalée de la mission GRAIL a permis d'améliorer les estimations de l'épaisseur de la croûte. En l'occurrence, les données suggèrent que la densité moyenne est bien plus faible qu'on ne le pensait précédemment, ce qui implique que l'épaisseur moyenne de la croûte, entre 34 et 43 kilomètres, est aussi inférieure à celle qui était attendue. L'une des conséquences directes de ces observations est que la Lune a une concentration en éléments réfractaires (tels les éléments radioactifs) similaire à celle de la Terre.



CARTE DU CHAMP DE GRAVITÉ mesuré par les sondes GRAIL. Elle permet d'identifier des cratères et des bassins où la croûte plus mince correspond à un champ de gravité moins intense *(en bleu)* et des plateaux ou le champ est plus élevé *(en rouge)*.

le manteau sous-jacent, créant ainsi une structure instable. On rejoint ici le scénario proposé pour expliquer l'asymétrie de composition de la croûte: cette couche coule dans le manteau et remonte préférentiellement vers la face visible, en particulier dans la région de Procellarum KREEP Terrane. En remontant, avec la baisse de pression, la couche fond et produit le type de volcanisme attendu en surface. L'un des succès de ce modèle est la temporalité: les coulées les plus anciennes ont au plus 300 millions d'années. Il semble aussi compatible avec l'idée que les éléments plus denses ont tendance à s'enfoncer dans le manteau. En revanche, la composition de ces laves ne correspond pas directement aux observations. Dans ce scénario, on s'attend à ce que les basaltes soient riches en éléments incompatibles, ce qui n'est pas clairement le cas.

Des volcans sur la Lune

Une autre version considère cet enrichissement en éléments radioactifs comme la cause du volcanisme. En supposant que, lors de la réorganisation interne des éléments incompatibles, ils se soient accumulés dans la région de Procellarum, la couche formée aurait chauffé jusqu'à faire fondre la partie supérieure du manteau et produire une activité volcanique locale qui n'a pu durer jusqu'à récemment. Le processus s'étale sur une durée qui correspond aussi au délai d'observation des premières coulées de lave. L'étude d'échantillons ramenés de la surface lunaire suggère que les éléments radioactifs sont surtout mélangés à la croûte et peu présents dans les coulées de lave, ce qui renforce cette version de l'histoire lunaire.

Aucun des deux scénarios n'est encore pleinement satisfaisant. Dans le premier cas, les conditions pour expliquer la migration des éléments radioactifs sont incertaines. Comme nous l'avons vu, il n'existe pas encore de mécanisme généralement admis permettant d'expliquer la répartition hétérogène des éléments incompatibles sous la croûte lunaire. Un tel modèle est aussi nécessaire pour apporter du poids au second modèle. Par ailleurs, l'évolution du manteau a des conséquences directes sur l'évolution du noyau et donc sur la génération du champ magnétique primordial.

L'histoire de la Lune nous cache-t-elle encore d'autres surprises? On le saura peut-être bientôt grâce au regain d'intérêt pour l'exploration lunaire. Des missions préparées par les grandes puissances du domaine de l'exploration spatiale pourraient conduire à de grandes découvertes même si elles n'ont pas toutes des objectifs scientifiques.

Les observations de la Lune nous révèlent, pour l'instant, une image incomplète dont les pièces ne s'ajustent pas toujours bien entre elles. Les astronomes ont néanmoins beaucoup progressé, ces dernières décennies, dans leur compréhension du compagnon de la Terre. Et la Lune, qui a longtemps été considérée comme un corps inerte à l'histoire peu palpitante se révèle être un corps céleste actif et fort intrigant. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. A. Siegler *et al.*, **Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen**, *Nature*, vol. 531, pp. 480-484, 2016.

M. Touboul *et al.*, **Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon**, *Nature*, vol. 520, pp. 530-533, 2015.

B. P. Weiss et S. M. Tikoo, **The lunar dynamo**, *Science*, vol. 346, n° 6214, 2014.

D. Cébron *et al.*, **Le magnétisme de la Lune**, *Pour la Science*, n° 424, février 2013.

M. A. Wieczorek *et al.*, **The crust of the Moon as seen by GRAIL**, *Science*, vol. 339, n° 6120, 2013.

M. Ohtake *et al.*, **Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials**, *Nature Geoscience*, vol. 5, pp. 384-388, 2012.

M. Cuk et S. T. Stewart, **Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning**, *Science*, vol. 338, n° 6110, 2012.

Gastornis l'oiseau carnivore devenu végétarien

Delphine Angst, Eric Buffetaut, Christophe Lécuyer et Romain Amiot

Gastornis ? **Un oiseau géant au bec puissant qui dévorait les mammifères à l'aube du Tertiaire, a-t-on longtemps pensé. Erreur : le colosse était herbivore.**

APPARU EN EUROPE il y a quelque 60 millions d'années, *Gastornis*, malgré sa taille de 1,5 mètre et son bec imposant, était probablement un oiseau placide, à l'image de cette reconstitution du paléontographiste Alain Bénéteau.

© Alain Bénéteau/paleospot.com



Si vous entrez le mot *Gastornis* sur Internet, la plupart des images que vous trouverez seront celles d'un impressionnant oiseau géant attaquant avec férocité de petits mammifères. Et pour cause. Depuis la découverte, à la fin du XIX[e] siècle et au début du XX[e], de plusieurs ossements de cette espèce disparue du début du Tertiaire, les reconstructions de l'animal le présentaient tel une grue terrifiante, un rapace terrestre maître du monde au Paléocène qui aurait décliné avec l'avènement des mammifères carnivores, comme l'écrivait encore en 1971 le paléontologue finlandais Björn Kurtén dans son livre *The Age of Mammals*.

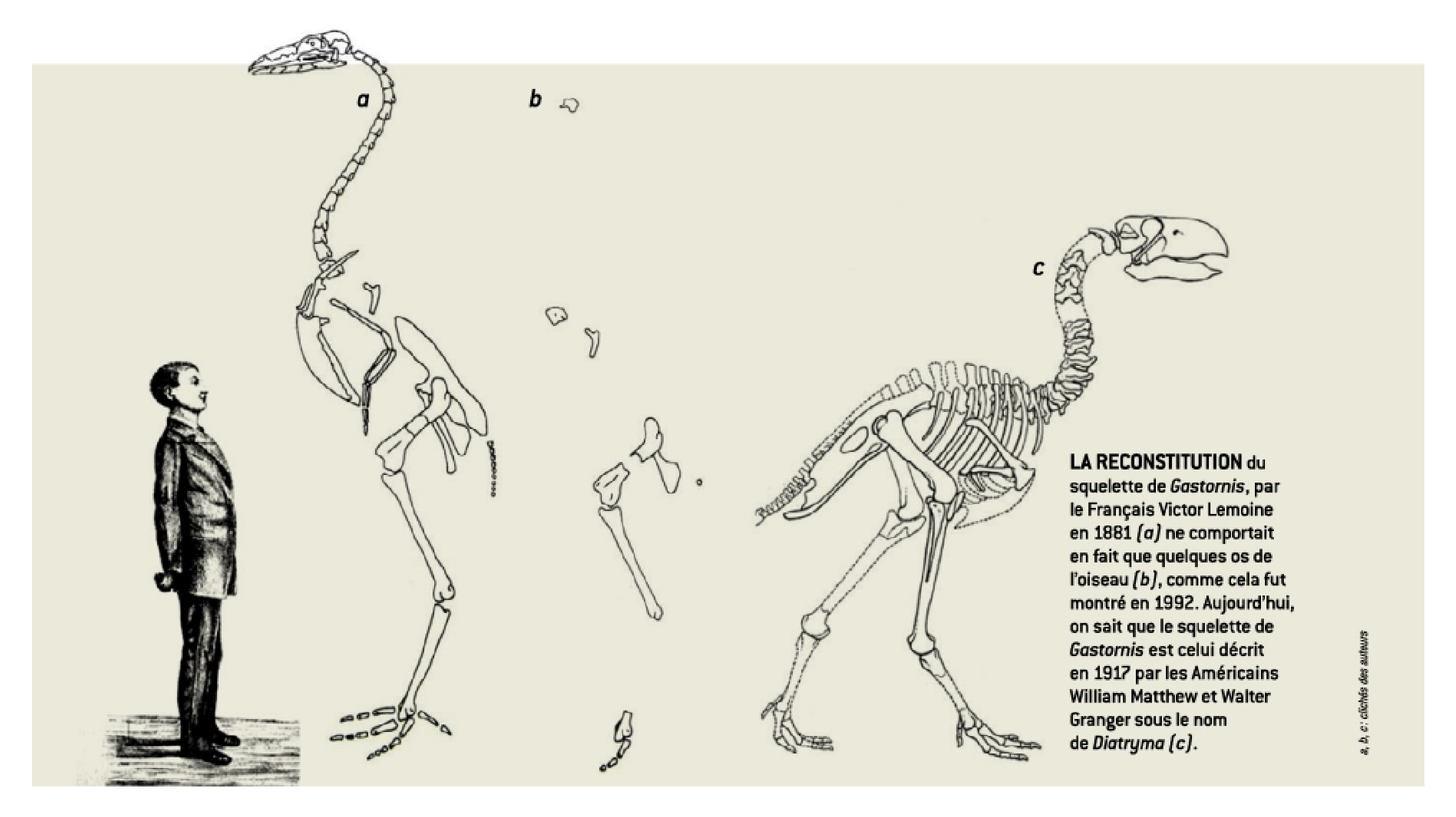
Certes, le scénario de l'oiseau carnivore est tentant, d'autant qu'il s'inscrit bien dans l'histoire de la faune terrestre. Jusqu'à la fin du Crétacé en effet, les plus grands animaux terrestres étaient les dinosaures. Ils avaient des tailles et des modes de vie très variés leur permettant de se répartir dans les différentes niches écologiques. Mais durant la crise Crétacé-Tertiaire, il y a 66 millions d'années, ces dinosaures se sont éteints, laissant libres de très nombreuses niches écologiques continentales. Ainsi, juste après l'extinction des dinosaures, au début du Tertiaire, le seul animal terrestre de grande taille était *Gastornis*. Alors que les mammifères ne dépassaient pas la taille d'un gros chien, ces oiseaux mesuraient environ 1,5 mètre de haut. Apparus en Europe au Paléocène, il y a quelque 60 millions d'années, ces géants s'éteignirent au milieu de l'Éocène, il y a environ 42 millions d'années, après avoir colonisé l'Amérique du Nord et l'Asie.

L'ESSENTIEL

- **En 1855, un os d'oiseau géant du Tertiaire fut découvert près de Meudon, puis d'autres furent trouvés en Europe, en Asie et aux États-Unis.**
- **Jusqu'en 2014, la majorité des reconstitutions de l'oiseau *Gastornis* l'ont présenté comme un terrible prédateur.**
- **De nouvelles études sur ses ossements montrent qu'il s'agissait plutôt d'un herbivore se déplaçant lentement.**
- **Cette histoire témoigne de l'impact des reconstitutions et de l'imaginaire collectif sur les interprétations paléontologiques.**

En quoi ces oiseaux ont-ils été les successeurs des dinosaures dans les environnements terrestres post-crise ? Quelle niche écologique occupaient-ils ? Comment vivaient-ils ? Qu'il s'agisse de leur régime alimentaire, de leur mode de locomotion ou de leur stratégie de reproduction, ces questions sont longtemps restées sans réponse, d'autant que l'histoire de la découverte de *Gastornis* a eu plusieurs rebondissements qui ont brouillé les pistes. Mais de nouvelles études viennent de résoudre une partie du mystère grâce à des approches pluridisciplinaires combinant paléontologie classique et nouvelles technologies. *Gastornis* serait plus proche du placide takahé de Nouvelle-Zélande que d'un terrible prédateur.

Le premier fossile de *Gastornis* fut découvert en 1855 dans le conglomérat



LA RECONSTITUTION du squelette de *Gastornis*, par le Français Victor Lemoine en 1881 *(a)* ne comportait en fait que quelques os de l'oiseau *(b)*, comme cela fut montré en 1992. Aujourd'hui, on sait que le squelette de *Gastornis* est celui décrit en 1917 par les Américains William Matthew et Walter Granger sous le nom de *Diatryma (c)*.

de Meudon, près de Paris. Ce fossile, correspondant à un tibiotarse (os de la patte), fut nommé *Gastornis parisiensis* en l'honneur du physicien Gaston Planté, son découvreur. Par la suite, Victor Lemoine, médecin à Reims et passionné de paléontologie, exhuma des fossiles complémentaires de *Gastornis* dans le nord-est de la France et, dès 1881, en proposa une reconstitution : un grand oiseau aux longues pattes et aux ailes réduites, arborant un long cou et un bec assez allongé *(voir la figure page ci-contre)*. À en croire le médecin, ses mâchoires portaient des excroissances peut-être assimilables à des dents. Ainsi, à une époque où les idées de Darwin se répandaient chez les paléontologues, *Gastornis* semblait être un animal intermédiaire entre les reptiles et les oiseaux.

Les os appartenaient en fait pour la plupart à divers autres animaux : tortues, poissons et une sorte de crocodile

Diatryma contre *Gastornis*

Parallèlement, en 1876 en Amérique du Nord, le paléontologue Edward Cope décrivit un nouveau fossile d'oiseau géant qu'il nomma *Diatryma* en indiquant qu'il était proche de *Gastornis*. Durant plusieurs décennies, les deux noms coexistèrent, les fossiles trouvés en Europe prenant le nom de *Gastornis* et ceux d'Amérique du Nord celui de *Diatryma*. En 1917, cependant, deux autres paléontologues américains, William Matthew et Walter Granger, décrivirent un squelette quasiment complet de *Diatryma* provenant de l'Éocène inférieur du Wyoming et permettant une reconstitution globale de cet oiseau, caractérisé par une grosse tête au bec énorme et sans dents que portait un cou robuste.

Les différences particulièrement marquées entre cette reconstitution et celle de *Gastornis* faite par Lemoine plus de trente ans auparavant aboutirent à séparer nettement les genres *Diatryma* et *Gastornis*. De plus, l'excellente conservation du fossile américain éclipsa les ossements isolés de *Gastornis*. C'est pourquoi, à partir des années 1920, la grande majorité des spécimens européens furent attribués à *Diatryma* plutôt qu'à *Gastornis*.

Cette situation dura jusqu'au début des années 1990, lorsque le paléontologue américain Larry Martin fit une révision complète du matériel de *Gastornis* que Lemoine avait rassemblé pour sa reconstitution. Martin mit alors en évidence que la grande majorité des os utilisés n'appartenait ni à *Gastornis* ni même à un oiseau. Les fossiles correspondaient à divers autres animaux comprenant aussi bien des tortues que des poissons ou des champsosaures (sortes de reptiles aquatiques ressemblant à des crocodiles). Le principal argument séparant *Gastornis* de *Diatryma* était donc sérieusement remis en cause. Martin proposa alors de regrouper ces deux genres au sein d'une même famille : les Gastornithidae.

Mieux : le réexamen récent des fossiles, dont l'étude d'une nouvelle mandibule de *Gastornis*, a montré qu'il s'agit d'un seul et même genre qui doit être appelé *Gastornis*, ce nom ayant été proposé en premier et *Diatryma* en étant un synonyme. Il s'agit là d'un exemple tout à fait marquant de l'importance que les reconstitutions peuvent avoir sur l'évolution des interprétations paléontologiques, car sans la représentation erronée de *Gastornis* réalisée par Lemoine, le nom de *Diatryma* ne se serait peut-être jamais imposé.

Pas de dents, mais un bec étrange

Gastornis n'avait donc pas de dents, mais la question de son écologie, et notamment de son régime alimentaire, n'était pas résolue pour autant… Elle ne le fut pas avant 2014. Et là encore, les représentations que l'on se faisait de l'oiseau ont eu un impact important, non seulement sur les interprétations scientifiques, mais aussi sur l'imaginaire collectif.

De fait, afin de mieux comprendre comment étaient organisés les écosystèmes terrestres suite à l'extinction des dinosaures, une des premières questions que se sont posées les scientifiques concerna le régime alimentaire de ces oiseaux. Pour la majorité des vertébrés fossiles, l'étude du régime alimentaire est fondée sur celle des dents. Les Gastornithidae en étant dépourvus, la méthode était inapplicable. Dans le cas des oiseaux, cependant, un autre indice permet en général de résoudre la question : la forme du bec, que l'on compare à celle des oiseaux actuels d'écologie connue.

■ LES AUTEURS

Delphine ANGST, paléontologue et géochimiste, est postdoctorante à l'université de Cape Town, en Afrique du Sud.

Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris (CNRS, UMR 8538).

Christophe LÉCUYER est professeur au Laboratoire de géologie de Lyon (LGLTPE), à l'université de Lyon 1 et membre de l'Institut universitaire de France.

Romain AMIOT est chargé de recherche dans le même laboratoire.

Mais les Gastornithidae sont particuliers, car leur bec ne ressemble à celui d'aucun groupe actuel. Cette spécificité a donc été à l'origine d'un débat vieux de plus de vingt ans sur le régime alimentaire de *Gastornis*.

En 1991, en se fondant sur une étude biomécanique de la mâchoire de ces oiseaux, Lawrence Witmer et Kenneth Rose, de l'université Johns Hopkins, ont conclu qu'il s'agissait de féroces prédateurs. Un an plus tard, en 1992, l'ornithologue américain Allison Andors fit une étude similaire sur les mêmes fossiles et conclut à un régime herbivore. La contradiction entre les conclusions de ces deux études, quasi-simultanées, sur le même matériel fossile, et avec des méthodes très proches, montre les limites des méthodes comparatives classiques de paléontologie.

Ignorant le débat, jusqu'en 2014, la majorité des représentations de *Gastornis* mettent en scène un terrible prédateur pourchassant de petits mammifères, alors que quasiment aucune reconstitution ne suggère qu'il pourrait être herbivore. Ce choix délibéré, probablement motivé par des raisons plus ou moins sensationnalistes, a eu des conséquences importantes sur l'image collective du régime alimentaire de *Gastornis*. Ainsi, même des documentaires sérieux ou des revues scientifiques de qualité pour le grand public ont totalement occulté la seconde hypothèse. Ce choix de représentation est à l'origine d'un bon nombre de confusions entre les Gastornithidae et les Phorusrhacidae, des oiseaux géants terrestres carnivores et coureurs connus en Amérique du Sud et du Nord, en Afrique du Nord et en Europe, mais pour des périodes plus récentes, et dont l'anatomie est très différente de celle des Gastornithidae.

Des mesures isotopiques

Comment déterminer si *Gastornis* était plutôt carnivore ou herbivore? Une méthode consiste à étudier la proportion des isotopes de carbone dans les ossements de l'animal et de la comparer avec celle d'oiseaux actuels carnivores ou herbivores.

Les isotopes d'un élément chimique X présentent le même nombre de protons dans leur noyau, mais un nombre différent A de neutrons et sont alors notés ^{A}X.

Un isotope avec un petit nombre de neutrons est dit léger et, à l'inverse, celui avec le plus grand nombre de neutrons est dit lourd. Il existe deux grands types d'isotopes: les isotopes stables et les isotopes radioactifs.

Les isotopes radioactifs se transforment en un autre élément avec émission de radioactivité, et ce au bout d'un temps moyen connu et spécifique de chaque élément – sa constante de désintégration. Par exemple, l'isotope du carbone à 14 neutrons, le carbone 14 ou ^{14}C, se transforme en azote 14 (^{14}N) en environ 5700 ans.

À l'inverse, les isotopes stables correspondent à des éléments ne pouvant pas se désintégrer, et restant stables au cours du temps. Dans le cas du carbone, il existe deux isotopes stables, le carbone 12 (^{12}C) et le carbone 13 (^{13}C).

Ces deux isotopes sont présents en différentes proportions dans les structures géologiques ou biologiques, sans variations au cours du temps. La proportion d'isotopes lourds ^{13}C par rapport aux isotopes légers ^{12}C est définie par le rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$. Dans le cas des isotopes stables, les différences de rapports isotopiques entre plusieurs réservoirs sont très faibles, ne dépassant pas la cinquième ou sixième décimale. C'est pourquoi, afin de comparer plusieurs rapports isotopiques de façon précise, la notation delta (δ) a été proposée.

Cette notation compare le rapport isotopique de l'échantillon par rapport à celui d'un standard et est exprimée en pour mille (‰). Un delta positif correspond donc à un enrichissement de l'échantillon en isotopes lourds par rapport au standard.

Dans le cas de l'étude du régime alimentaire de *Gastornis*, c'est donc le $\delta^{13}C$ du carbonate de l'apatite des os qui est mesuré afin de savoir s'il était plutôt carnivore ou herbivore. On le compare à celui d'oiseaux actuels suivant l'un ou l'autre de ces régimes, en supposant que la physiologie de *Gastornis* était similaire, et on en déduit le rapport isotopique de sa nourriture, qui indique si elle est animale ou végétale. Résultat: celle de *Gastornis* était végétale...

– D. A.

Des muscles de pintade

Le débat sur le régime alimentaire de *Gastornis* ne s'est clos qu'en 2014 avec de nouvelles études que nous avons menées. Faute de trouver la réponse par les voies classiques, nous avons cherché d'autres méthodes. Nous avons opté pour deux approches complémentaires: une étude de morphologie fonctionnelle et une étude de géochimie isotopique.

La morphologie fonctionnelle consiste à étudier le lien entre l'écologie d'un animal et ses capacités mécaniques. Ainsi, avec la collaboration d'Anick Abourachid et Anthony Herrel, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, nous avons étudié les muscles du crâne de divers oiseaux actuels dont on connaissait l'écologie afin de voir s'il existait un lien entre le type de nourriture que ces oiseaux consomment et la musculature de leur mâchoire.

Des rapaces représentaient les oiseaux carnivores et des poulets, pintades et pinsons, les oiseaux herbivores. Après avoir disséqué plusieurs crânes de ces oiseaux actuels, nous avons mesuré et pesé l'ensemble des muscles du crâne. Nous avons ainsi montré que chez les oiseaux carnivores actuels, le muscle permettant de fermer la mâchoire (muscle adducteur) est peu développé, alors que celui permettant de mouvoir la pointe du bec (muscle ptérygoïde) est très gros *(voir la figure page 43)*. Cela est dû à la façon dont ces animaux se nourrissent,



GASTORNIS a longtemps été mis en scène comme un terrible prédateur de mammifères...

en arrachant des morceaux de viande avec la pointe de leur bec et en les gobant sans les broyer. Ils ont donc besoin d'une grande puissance à l'avant de leur bec et d'une faible puissance de broyage au moment de refermer la mâchoire. À l'inverse, chez les oiseaux herbivores actuels, le muscle adducteur est très développé, leur permettant de broyer des plantes et des graines dures, alors que le muscle ptérygoïde est très réduit.

Une fois ce modèle établi, nous l'avons appliqué aux Gastornithidae, dont deux mâchoires particulièrement bien préservées (conservées au Muséum de New York et au Muséum de Toulouse) portent les traces des zones d'insertion de ces deux muscles, ce qui permet d'estimer leur importance relative. Ces traces montrent que *Gastornis* présentait un muscle adducteur très développé et un muscle ptérygoïde très réduit, et qu'il avait donc un régime alimentaire herbivore.

Parallèlement à cette étude, nous avons utilisé une seconde approche, la géochimie isotopique, pour déterminer indépendamment le régime alimentaire de *Gastornis*. Cette approche est fondée sur l'analyse isotopique du carbone présent dans les ossements des oiseaux et dans leur nourriture, c'est-à-dire sur l'analyse de la proportion des isotopes de carbone dans ces éléments *(voir l'encadré page ci-contre)*. En effet, cette proportion diffère dans les plantes et dans la viande. Elle dépend aussi de la physiologie de l'animal : lorsqu'un animal se nourrit, il incorpore dans ses os et dans ses dents une certaine proportion des isotopes de carbone en fonction de son métabolisme. On dit qu'il y a un fractionnement isotopique entre les tissus minéralisés (os, dents) et l'alimentation. Par conséquent, si l'on connaît la valeur de ce fractionnement isotopique chez un animal, on peut, à partir de l'analyse isotopique de ses ossements, en déduire la proportion des isotopes de carbone dans les aliments qu'il a consommés, et ainsi remonter à son régime alimentaire.

Un oiseau herbivore

Chez un animal actuel dont on connaît les habitudes alimentaires, déterminer la valeur du fractionnement isotopique est simple : il suffit de mesurer la proportion des isotopes dans les ossements et d'en soustraire celle de sa nourriture. Aussi avons-nous d'abord effectué l'étude sur des oiseaux actuels d'écologie connue : un modèle carnivore – des vautours – et un modèle herbivore – des autruches – nous ont fourni deux valeurs différentes du fractionnement isotopique des oiseaux

en fonction de leur régime alimentaire. Grâce à ces données, et en considérant que les oiseaux du Tertiaire avaient une physiologie très proche de celle des oiseaux actuels, nous avons déterminé le régime alimentaire de *Gastornis*.

En effet, les mesures isotopiques du carbone de *Gastornis* ont permis d'estimer que si ces oiseaux étaient carnivores, ils devaient consommer de la viande issue d'animaux ne s'étant nourris que de plantes de type C4 (des plantes adaptées aux environnements secs). Or, dans l'histoire de la Terre, ce type de plantes n'est apparu que beaucoup plus récemment. Les Gastornithidae ne pouvaient donc pas être carnivores. À l'inverse, l'hypothèse d'un régime alimentaire herbivore est confirmée, car les proportions isotopiques des plantes consommées alors déduites sont cohérentes avec celles connues pour les végétaux de l'époque. *Gastornis* n'était donc pas un féroce prédateur s'attaquant aux malheureux petits chevaux du Tertiaire, mais plutôt un oiseau herbivore.

Un autre point de l'écologie des Gastornithidae qui a été faussé par les représentations est sa locomotion. Sur la grande majorité des illustrations représentant *Gastornis*, non seulement cet oiseau est carnivore, mais il pratique une chasse active en poursuivant ses proies sur un modèle proche de celui des grands prédateurs actuels tels que les fauves *(voir la figure page 41)*. Mais *Gastornis* était-il réellement capable de courir de cette façon ? En d'autres termes, l'oiseau avait-il une locomotion dite cursoriale (coureur), avec la possibilité de longues périodes de course rapide, ou était-il graviporteur (marcheur), c'est-à-dire de locomotion relativement lente, capable de courir, mais seulement sur de courtes durées ?

Coureur ou marcheur ?

Dans les années 1960, l'ornithologue américain William Storer a proposé une méthode pour discriminer ces deux modes de locomotion, fondée sur les proportions des trois os longs formant la patte d'un oiseau : le fémur, le tibiotarse et le tarsométatarse. Un oiseau coureur aura un tarsométatarse plus long par rapport aux deux autres os de la patte et, à l'inverse, le tarsométatarse d'un oiseau marcheur sera plus court. En appliquant ce modèle à *Gastornis*, on montre que cet oiseau était graviporteur, incapable de courir vite et longtemps…

Un des derniers éléments de l'écologie des Gastornithidae découvert ces dernières

COMMENT ON REMONTE DES COQUILLES À *GASTORNIS*

En Provence et dans les Corbières, on connaît depuis les années 1950, dans les dépôts continentaux du début du Tertiaire, des fragments de coquilles d'œufs de grands oiseaux, souvent présents en abondance. Il avait été suggéré que *Gastornis* avait pu les pondre. Afin de tester cette hypothèse, nous avons récolté sur le terrain de nombreux fragments et étudié chacun en détail.

En Europe, pour cette période, seuls trois genres d'oiseaux fossiles de grande taille sont connus : *Gastornis*, *Palaeotis* et *Remiornis*. Leurs tailles étant différentes, celles de leurs œufs devaient l'être aussi. L'estimation de la taille des œufs grâce à l'étude des fragments de coquilles nous a permis d'identifier lequel de ces trois oiseaux les avait pondus.

Les courbures maximales et minimales des coquilles d'œuf ont été mesurées pour tous les fragments de taille suffisante. À partir de ces mesures et de différentes relations établies pour des émeus actuels, nous avons estimé que les œufs mesuraient environ 12 centimètres (cm) de largeur et 19 de longueur.

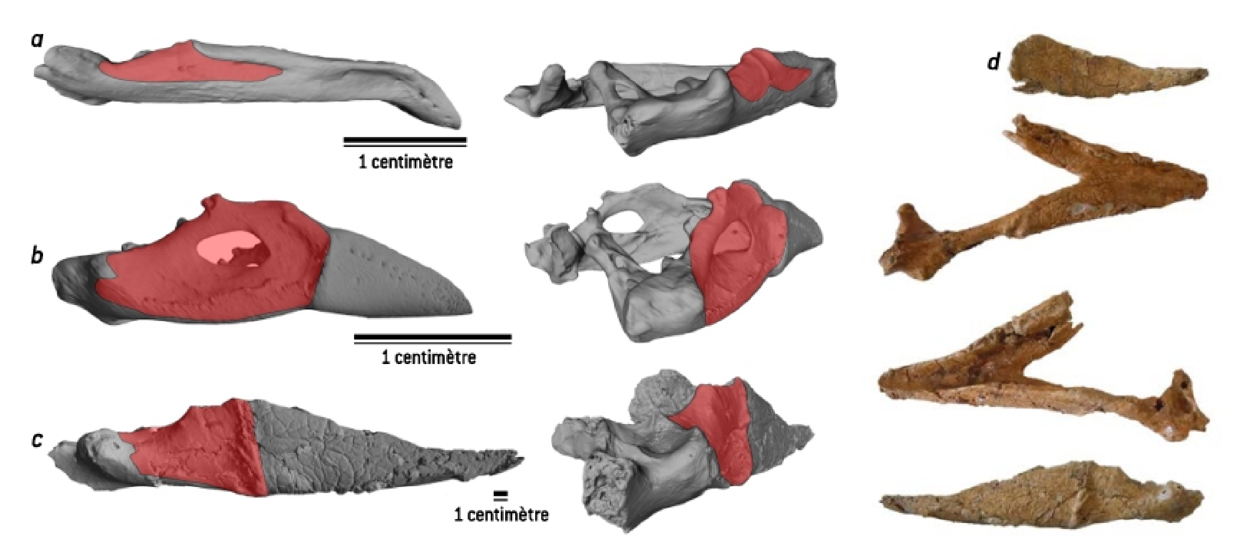
Connaissant la taille des œufs pondus par les oiseaux tertiaires dans le sud de la France, on calcule alors leur volume puis leur masse grâce à différentes équations. Les œufs pondus avaient un volume d'environ 1 330 cm^3 et une masse d'environ 1,4 kilogramme, ce qui correspond à des valeurs proches de ce qui est connu pour les plus gros œufs d'autruches actuelles.

De tels œufs correspondent à des oiseaux de très grande taille, pesant jusqu'à 150 kilogrammes. Parmi les oiseaux connus en Europe à cette période, seul *Gastornis* aurait pu pondre de tels œufs. À partir de cette conclusion, on déduit nombre d'informations sur la stratégie de reproduction des Gastornithidae.

– D. A.


Cliché des auteurs

MINUSCULES, les fragments de coquilles trouvés dans le sud de la France permettent tout de même, en mesurant leur courbure, d'estimer la taille des œufs, et de là celle de l'oiseau qui les a pondus.



LE MUSCLE ACTIONNANT LA MÂCHOIRE D'UN OISEAU, le muscle adducteur, ne se développe pas de la même façon selon que l'animal est carnivore ou herbivore. Chez un oiseau carnivore actuel tel une buse, sa zone d'insertion sur la mâchoire est petite *(a, en rouge)*. Chez un oiseau herbivore tel le pinson de Darwin, elle est large *(b)*, tout comme chez *Gastornis (c)*, dont on a retrouvé plusieurs ossements de mandibule *(d)*.

années est la stratégie de reproduction de ces oiseaux. En effet, jusqu'en 2013, aucune information n'existait à ce sujet. Aucun œuf d'oiseau fossile n'ayant pu être attribué de façon claire à *Gastornis*, il était impossible de savoir combien d'œufs étaient pondus par nid, ni si ces nids étaient enterrés ou déposés à même le sol, ou s'il existait des zones de ponte préférentielles où différents parents venaient pondre. Les réponses à ces questions ont été apportées grâce à la récolte de centaines de fragments de coquilles d'œuf dans le sud de la France et à leur attribution à *Gastornis* *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Des coquilles ornées

La très grande concentration de coquilles d'œufs sur différents sites tertiaires du sud de la France suggère que plusieurs pontes étaient rassemblées sur des sites communs, des sortes de lieux de ponte préférentiels sans doute choisis pour des raisons environnementales. D'après la répartition de ces sites, ces grands oiseaux vivaient probablement en groupe, au moins au moment de la reproduction, comme les autruches actuelles. De plus, aucun œuf n'a été retrouvé entier, contrairement aux nombreuses pontes de dinosaures constituées d'œufs entiers découvertes dans le Crétacé du sud de la France. Il est donc fort probable que les nids de *Gastornis* aient été construits à même le sol, comme chez les autruches, et non enterrés comme ceux des dinosaures. Les œufs de *Gastornis* auraient alors été détruits avant la fossilisation par le piétinement ou les intempéries.

Enfin, l'ornementation de la surface des fragments de coquilles fournit aussi des renseignements sur la stratégie de ponte de ces oiseaux. Les fragments présentent des traces qui pourraient correspondre à un gradient d'usure de la coquille lors du frottement des œufs entre eux dans le nid, comme on l'observe à la surface des œufs d'autruches actuelles. Les nids devaient donc contenir plusieurs œufs.

Ainsi, les Gastornithidae, successeurs des grands dinosaures, n'étaient pas de terribles prédateurs, mais des oiseaux géants herbivores, se déplaçant plutôt lentement dans des environnements chauds et plus ou moins humides en fonction des régions (plutôt sec dans le sud de la France et plus humide dans le nord de l'Allemagne). Ces oiseaux se regroupaient dans des sites communs pour y pondre plusieurs œufs dans des nids construits à même le sol, sur un modèle proche de celui observé chez les autruches actuelles. Du scénario obsolète, il ne reste donc que le dénouement. *Gastornis* a probablement constitué une remarquable source de nourriture pour les mammifères carnivores qui montaient en puissance… ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Angst *et al.*, **Fossil avian eggs from the Palaeogene of southern France : New size estimates and a possible taxonomic identification of the egg-layer,** *Geological Magazine*, vol. 152, pp. 70-79, 2015.

D. Angst *et al.*, **Isotopic and anatomical evidence of an herbivorous diet in the Early Tertiary giant bird *Gastornis*. Implications for the structure of Paleocene terrestrial ecosystems,** *Naturwissenschaften*, vol. 4, pp. 313-322, 2014.

E. Buffetaut et D. Angst, **Gastornis : un mystérieux géant,** *Espèces*, Hors-série n° 1, pp 35-39, avril 2014.

D. Angst et E. Buffetaut, **The first mandible of *Gastornis* Hébert, 1855 (Aves, Gastornithidae) from the Thanetian (Paleocene) of Mont-de-Berru (France).** *Revue de Paléobiologie*, vol. 32, pp. 423-432, 2013.

La sélection de livres



IL Y A DES MILLIONS D'ANNÉES...

Découvrez notre sélection de titres pour vivre les découvertes et les enquêtes des scientifiques sur ce sujet passionnant : les stars de la paléontologie... et les oubliés !



PRIX DU BEAU LIVRE DE L'ACADÉMIE DE MARINE

Requins, de la préhistoire à nos jours

Gilles Cuny, Alain Bénéteau (illustr.)

C'est leur histoire, longue de plus de 400 millions d'années, que cet ouvrage vous propose de découvrir. Riche de plus de 150 reconstitutions originales, écrit par le spécialiste français des requins fossiles, cet ouvrage est un magnifique voyage dans le temps pour tous les passionnés des mondes disparus.

224 pages • 28.90 € • 978-2-7011-5423-7



La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer, Alain Bénéteau (illustr.)

Ce livre braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des animaux qui, bien avant les dinosaures, peuplaient notre planète. Le lecteur est convié à un voyage dans le temps qui commence il y a environ 370 millions d'années. Pour les passionnés des mondes perdus !

208 pages • 26.90 € • 978-2-7011-4206-7



Le secret de l'archéobélodon

Alexandre Mille, Jean-Guy Michard et Pascal Tassy

C'est une enquête de près de deux siècles que ce livre propose. 1804, au Muséum national d'Histoire naturelle, Georges Cuvier tient entre ses mains une grosse molaire. Cent ans seront nécessaires pour reconstituer l'animal à qui appartenait cette molaire. Cent ans de plus seront nécessaires pour déterminer qui était vraiment le mastodonte, spectaculaire ancêtre de l'éléphant.

144 pages • 23 € • 978-2-7011-9298-7

En partenariat avec les éditeurs

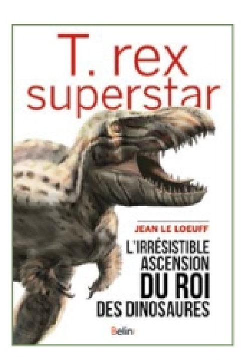


editions-belin.com



editions-lepommier.fr

Tous ces livres sont disponibles en librairie.

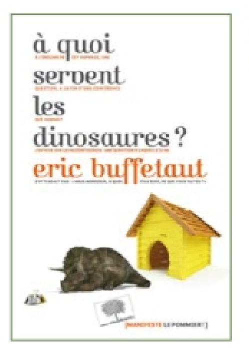


T. rex superstar

Jean Le Loeuff

S'il ne doit en rester qu'un, ce sera sans doute lui. À la question « quel dinosaure connaissez-vous », 90% des gens répondent : « le tyrannosaure ! » Jean Le Loeuff, d'une plume érudite et irrésistiblement drôle, dresse le portrait de cet archétype du grand prédateur qu'est *Tyrannosaurus*, à la lumière des découvertes scientifiques les plus récentes.

240 pages • 19 € • 978-2-7011-9768-5

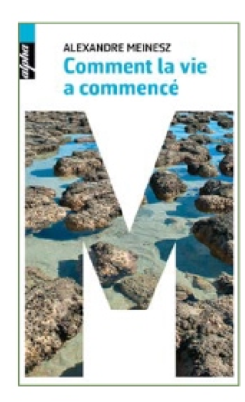


À quoi servent les dinosaures ?

Eric Buffetaut

À la fin d'une conférence que donnait l'auteur sur la paléontologie, vint une question à laquelle il ne s'attendait pas : « Mais Monsieur, à quoi cela sert, ce que vous faites ? » Rien d'agressif dans le ton de la dame qui l'interrogeait ainsi, mais une perplexité certaine : quelle utilité cela pouvait-il bien avoir de s'intéresser à des êtres morts depuis des millions d'années ?

96 pages • 12 € • 978-2-7465-0666-4



Comment la vie a commencé

Alexandre Meinesz

D'où vient la vie ? Comment est-elle apparue sur Terre ? Quels ont été les premiers organismes vivants ? Comment l'évolution a-t-elle sculpté le vivant au fil du temps ? L'auteur raconte avec passion les découvertes les plus récentes sur l'histoire de la vie.

160 pages • 11.90 € • 978-2-7011-9803-3



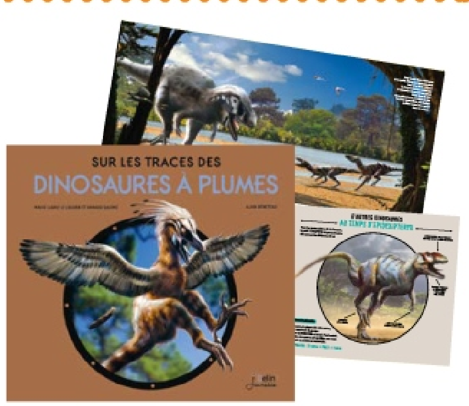
Le paléontologue et l'évolution

Pascal Tassy

Vous êtes-vous jamais demandé comment, à partir d'une simple mandibule, on peut identifier une espèce disparue ? En véritable détective, le paléontologue reconstruit ici pas à pas la formidable histoire du vivant. Les fossiles nous livrent tous leurs secrets !

128 pages • 8 € • 978-2-7465-1110-1

LE COIN JEUNESSE



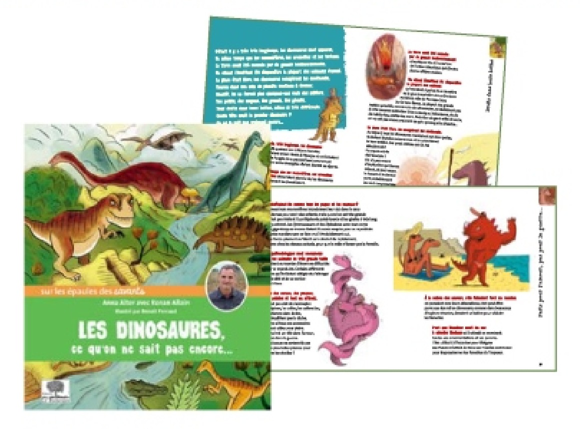
NOMINÉ AU PRIX LE GOÛT DES SCIENCES 2016

Sur les traces des dinosaures à plumes

Marie Laure Le Louarn Bonnet, Arnaud Salomé, Alain Bénéteau (illustr.)

D'*Epidexipteryx*, le plus ancien animal couvert de plumes, à *Archaeopteryx*, le premier dinosaure capable de planer, jusqu'à *Eoniantornis*, un dinosaure très habile au vol, voici un fascinant voyage dans le temps, qui débute il y a 175 millions d'années.

52 pages • 19.95 € • 978-2-7011-8959-8

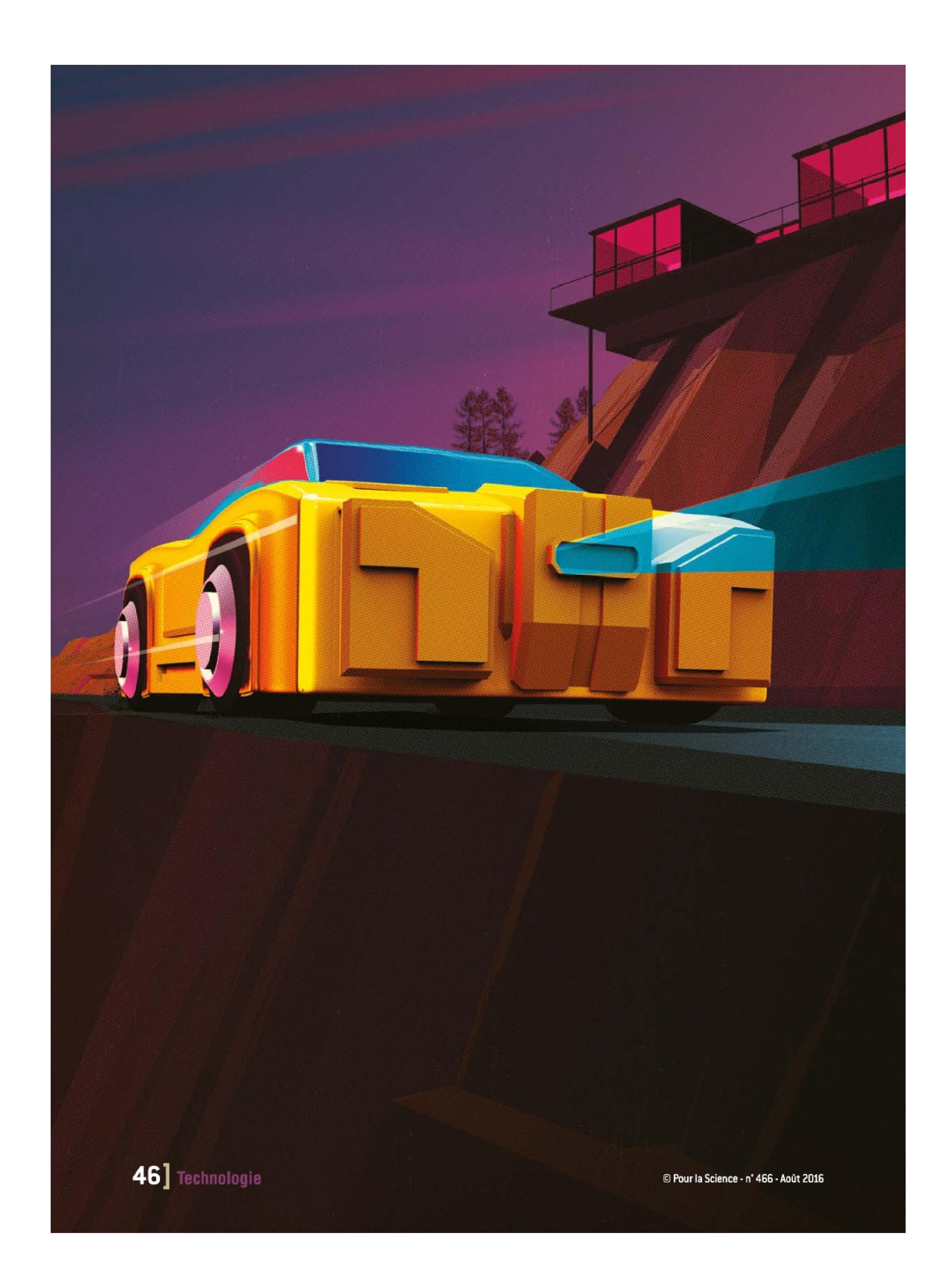


Les dinosaures, ce qu'on ne sait pas encore

Anna Alter, Ronan Allain, Benoît Perroud (illustr.)

Sur les épaules de Ronan Allain, paléontologue au Muséum national d'Histoire naturelle, Anna Alter nous propose un voyage surprenant et richement illustré au temps de ces animaux légendaires, qui continuent d'alimenter les débats scientifiques et les rêves de chacun… Et si les dinosaures n'avaient pas eu le sang froid mais tiède ?

48 pages • 13.90 € • 978-2-7465-1102-6



Les voitures en quête d'autonomie

Steven Shladover

L'automatisation complète des véhicules n'est pas pour demain. En revanche, la conduite automatisée dans des lieux et voies équipés à cet effet sera bientôt une réalité.

Bientôt, nous aurons tous un chauffeur. Il sera électronique et, quand nous le souhaiterons, il nous emmènera partout et en toute sécurité, du moins tant que nous n'aurons pas à tourner à gauche au milieu du trafic… Et puis, il arrivera que l'état de la chaussée lui crée un problème, comme la neige et la glace le feront à coup sûr… Il faudra aussi le surveiller un peu, pour lui rappeler d'éviter la gendarmerie, les ambulances, les camions de pompiers… et en ville, les piétons susceptibles de surgir de tous côtés.

Lors de telles rencontres sur la route, un pilote humain convenablement entraîné aura facilement toutes les réactions appropriées. En revanche, un pilote automatique ne les aura probablement pas, tant elles sont difficiles à programmer. Les problèmes d'automatisation correspondants sont encore ouverts et les résoudre exigera beaucoup de temps, d'efforts et d'argent. Or, dans le même temps, les gens ont autre chose en tête : ils s'attendent pratiquement d'un jour à l'autre à voir passer un véhicule entièrement automatique au coin de la rue.

D'où viennent ces attentes irréalistes ? D'abord, de l'amalgame terminologique qui frappe les systèmes de conduite automatisée. Tant les médias que les constructeurs automobiles emploient sans distinction les termes d'« autonome », de « sans conducteur », de « conduite automatique », alors qu'ils désignent des solutions techniques très différentes.

Les services commerciaux des constructeurs, des équipementiers (les industriels spécialisés dans les sous-systèmes automobiles) et des bureaux d'études, par exemple, créent sans cesse du matériel publicitaire qui exploite sciemment le flou régnant sur la part réelle du processus de conduite qui est automatisée.

Pour leur part, les journalistes du domaine ont une tendance acharnée à l'optimisme technologique, sans doute parce que cela leur permet de faire le spectacle en dépeignant un étonnant futur.

Les attentes de plus en plus irréalistes ainsi créées sont d'autant plus néfastes que l'avènement d'une forme de conduite automatisée est proche et devrait sauver des vies, réduire la pollution et la consommation de carburant. Elle n'aura toutefois pas la forme à laquelle les gens s'attendent.

Comment définir la conduite automatisée

La conduite d'un véhicule est une activité bien plus complexe que ne l'imaginent la plupart des gens. Elle demande de très nombreuses capacités, dont certaines sont plus faciles à

automatiser que d'autres. Par exemple, maintenir une vitesse constante sur une route dégagée est facile. Les régulateurs de vitesse usuels le font déjà depuis des décennies. Aujourd'hui, des régulateurs de vitesse adaptatifs, capables de maintenir à la fois une vitesse et une distance appropriées, font partie des options courantes. Il existe aussi des systèmes de maintien dans la voie de circulation. Ceux de Mercedes-Benz et Infiniti utilisent les signaux de caméras et de capteurs afin de contrôler la direction et maintenir le véhicule bien centré dans sa voie.

Si nous avons de plus en plus souvent affaire à des véhicules intelligents, cela ne doit pas nous leurrer : un fossé énorme sépare encore ces systèmes automatiques d'un système que l'on pourra considérer comme un pilote automatique entièrement autonome.

Pour clarifier les choses, SAE International (elle s'appelait anciennement Society of Automotive Engineers), l'association internationale des acteurs techniques du véhicule automoteur, a défini cinq niveaux d'automatisation de la conduite de véhicules. L'absence d'automatisation définit le niveau 0. Les trois niveaux suivants correspondent aux systèmes qui offrent la possibilité d'une intervention d'urgence du conducteur humain. Les dispositifs de maintien de trajectoire, tels les régulateurs adaptatifs de vitesse, les systèmes de maintien dans la voie, par exemple, appartiennent au niveau 1. Le niveau 2 accueille les combinaisons de solutions techniques mises en place pour automatiser des tâches de conduite complexes : un dispositif de maintien dans la voie couplé à un régulateur de vitesse adaptatif par exemple. Les systèmes de niveau 3 se fondent sur les dispositifs de niveaux 1 et 2 pour gérer entièrement une phase particulière de la conduite, par exemple la progression saccadée au sein d'un embouteillage. Toutefois, ils n'existent pas encore dans le commerce : l'automatisation de la conduite est limitée pour le moment aux niveaux 1 et 2.

Les niveaux 4 et 5 sont très différents dans la mesure où ils supposent un fonctionnement sans assistance humaine. Un système de niveau 4 pourra assumer toutes les sous-tâches de la conduite, mais uniquement dans des circonstances strictement définies, par exemple dans un parking clos ou sur une voie réservée de l'autoroute. Tout au sommet de l'échelle définie par SAE International, le niveau 5 est celui des véhicules entièrement automatisés, fonctionnant sans aucune assistance humaine même en cas d'urgence. Sans doute est-ce à cette autonomie complète que pensent les gens quand ils entendent Carlos Ghosn, le PDG de Nissan et de Renault, annoncer avec aplomb des voitures entièrement automatisées sur nos routes vers 2020.

La vérité est qu'aucun connaisseur de l'automobile ne s'attend à ce que des systèmes automatiques de niveau 5 soient mis sur le marché dès 2020. Selon toute vraisemblance, ce qui sera proposé en sera encore très éloigné. Même les systèmes de niveau 3 pourraient être encore très lointains, même si, paradoxalement, ceux de niveau 4 sont probablement proches. Pour saisir les raisons de cette situation paradoxale, il nous faut parler de logiciels.

Le défi est de dépasser la fiabilité humaine

Contrairement à ce que l'on croit, les conducteurs humains sont remarquablement efficaces, en tout cas pour éviter les accidents graves. Selon l'IRTAD (*International Road Traffic and Accident Database*), la circulation routière est responsable en France d'une dizaine de morts par milliard de kilomètres parcourus, ce qui correspond à peu près à la situation européenne. À cela s'ajoutent beaucoup de blessés. Ces ordres de grandeur indiquent les performances que doivent dépasser les dispositifs de conduite automatique. Nous en sommes encore bien loin, contrairement à ce que veulent bien admettre les adeptes de l'automatisation.

Pour comprendre pourquoi, songez juste au nombre de fois où votre ordinateur personnel s'est figé. Si un système d'exploitation, tel celui qui anime votre machine, était responsable de la conduite d'une automobile, la mort pourrait survenir aussi souvent que les pannes de système sur un ordinateur personnel. Et même quand un tel logiciel évite les blocages, il arrive souvent qu'il se mette à fonctionner lentement : or sur la route, il suffit parfois qu'une réaction soit retardée d'un dixième de seconde pour qu'un accident se produise. C'est bien la nécessité de réactions ultrarapides qui risque de rendre les logiciels de conduite automatique dangereux en situation réelle. Ces derniers doivent donc être conçus et développés avec des exigences bien supérieures à celles des logiciels courants du commerce.

L'AUTEUR



Steven SHLADOVER est l'un des fondateurs du projet PATH de transport routier automatisé de l'Institut du transport de l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis.

L'ESSENTIEL

- **La voiture qui se conduit elle-même a été survendue. Ce projet est encore loin d'aboutir.**
- **La conduite automatisée avec assistance humaine en cas d'urgence reste problématique.**
- **Il est plus facile de développer des dispositifs de conduite automatique dans des environnements aménagés.**
- **Ainsi, des voitures se garant seules ou pilotées automatiquement sur des voies d'autoroute spécialement conçues devraient être pour bientôt.**

LES CINQ NIVEAUX D'AUTOMATISATION DE LA CONDUITE

Les interactions entre les constructeurs et les journalistes du secteur automobile ont produit beaucoup de confusion dans le vocabulaire utilisé pour décrire les différents types d'automatisation de la conduite. Les expressions « véhicule autonome », « véhicule sans conducteur », « voiture autoconduite », souvent employées, sont peu éclairantes.

Pour clarifier les choses, l'association internationale des ingénieurs automobiles, SAE International, a défini cinq niveaux différents d'automatisation de la conduite. Cette échelle va d'un niveau 0, l'absence de toute assistance automatique à la conduite humaine, à un niveau 5, qui ne suppose aucune assistance humaine au pilotage automatique du véhicule.

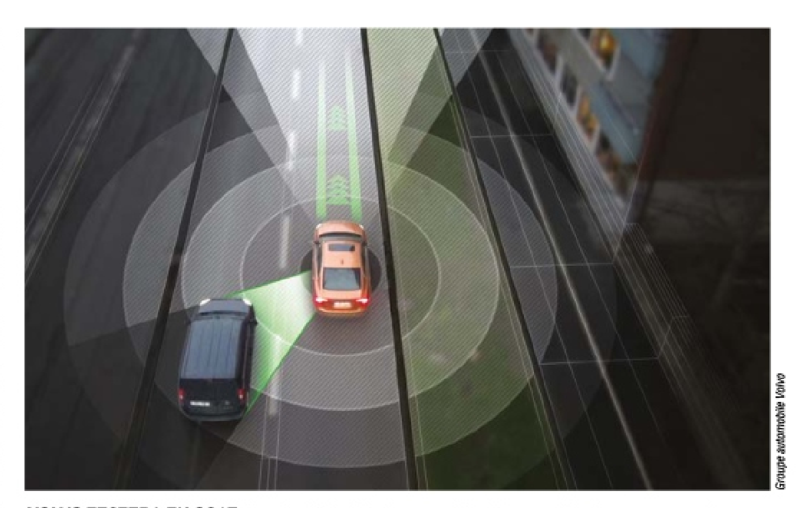
Cette échelle réserve quelques surprises. Par exemple, il s'est avéré que l'automatisation de niveau 4 – la conduite automatique sans aucune assistance humaine en conditions prédéfinies et stables – est beaucoup plus facile à mettre en œuvre que celle de niveau 3 – la conduite automatique pendant certaines phases de la conduite seulement.

Quant aux dispositifs de conduite automatique de niveau 5 – la voiture est conduite dans toutes les conditions par un pilote automatique – sont très loin d'être en vue. Si les progrès sont suffisants, ces dispositifs ne deviendront réalité que dans plusieurs décennies, selon Steven Shladover.

	Surveillance humaine de l'environnement			Surveillance automatique de l'environnement		
	0 Aucune automatisation	**1** Conduite assistée	**2** Automatisation partielle	**3** Automatisation conditionnelle	**4** Automatisation poussée	**5** Automatisation totale
	Absence de tout dispositif d'assistance à la conduite.	Des dispositifs aident le conducteur à maintenir sa vitesse ou à rester dans sa voie, mais le conducteur garde la main.	La conduite est partiellement automatisée en combinant plusieurs dispositifs de niveau 1.	Un dispositif automatique surveille l'environnement et conduit, mais le conducteur reprend la main en cas d'urgence.	Dans certaines conditions bien définies, un dispositif automatique pilote entièrement la voiture.	Un pilote automatique a entièrement remplacé le conducteur humain, en toutes circonstances.
Celui qui dirige, accélère et ralentit	Pilote humain	Pilote humain et pilote automatique	Pilote automatique	Pilote automatique	Pilote automatique	Pilote automatique
Celui qui surveille l'environnement routier	Pilote humain	Pilote humain	Pilote humain	Pilote automatique	Pilote automatique	Pilote automatique
Celui qui a la main en cas d'urgence	Pilote humain	Pilote humain	Pilote humain	Pilote humain	Pilote automatique	Pilote automatique
La part de la conduite qui est assistée ou automatisée	Aucune	Certaines phases	Certaines phases	Certaines phases	Certaines phases	Tout

D'après SAE International (www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf)/ Illustrations de Nigel Holmes

Satisfaire à de telles exigences sera extrêmement difficile. Des avancées fondamentales en ingénierie logicielle et en traitement du signal seront nécessaires. En outre, il faudra définir de nouvelles procédures de certification des performances du véhicule. Pour le moment, il n'y en a pas. Certes, il existe déjà des méthodes formelles afin d'analyser systématiquement tous les dysfonctionnements possibles d'un élément de programme, avant même que celui-ci n'ait été écrit. Ces procédures mathématiques de contrôle sont toutefois inapplicables aux logiciels complexes. Les chercheurs n'en sont qu'aux débuts de leurs travaux sur les possibilités de généraliser les vérifications formelles aux programmes complexes de pilotage automatique de véhicules.



Groupe automobile Volvo

VOLVO TESTERA EN 2017 plus de 100 véhicules capables de surveiller leur propre environnement et de se piloter eux-mêmes. Des véhicules de ce constructeur ont également fait l'objet de tests de conduite automatique en convoi.

Concevoir les logiciels, les tester, les valider…

Une fois de tels programmes écrits, il faudra aussi des méthodes assez puissantes pour les déboguer et les valider. Les méthodes existantes sont trop lourdes et leur mise en œuvre trop coûteuse.

À titre de comparaison, rappelons que la moitié du coût d'un nouvel avion commercial ou militaire est due à la vérification et à la validation des programmes de commande. Or les logiciels avioniques sont beaucoup moins complexes que ceux dont auront besoin des véhicules routiers automatisés. Quand ils conçoivent des pilotes automatiques, les ingénieurs aéronautiques savent qu'il n'y aura jamais plus d'un ou deux avions à proximité, dont ils n'ont pas besoin de connaître les positions et les vitesses avec une grande précision, car leur éloignement au moment de leur première détection donne plusieurs dizaines de secondes pour réagir.

Sur la route, il en va tout autrement. Le conducteur doit souvent prendre en une fraction de seconde des décisions sûres, qui impliquent, pour adapter correctement la trajectoire, d'estimer la vitesse de dizaines de véhicules et obstacles. La complexité d'un code informatique ayant de telles performances sera considérablement supérieure à celle d'un code avionique.

À supposer que l'on ait déjà développé et validé un tel logiciel de pilotage, les constructeurs automobiles auront encore à «prouver» la fiabilité d'un véhicule conduit à l'aide de ce programme, d'après les critères de la gestion des risques en entreprise, des compagnies d'assurances, des associations de conducteurs, des autorités et, bien sûr, des éventuels clients. Les tests actuels de validation sont complètement inutilisables pour des véhicules autonomes. Il faudrait que le véhicule automatique parcoure des centaines de millions de kilomètres avant que l'on puisse être statistiquement sûr qu'il triomphera des situations dangereuses auxquelles il sera confronté une fois produit en série et utilisé par des milliers de clients. Des experts réfléchissent déjà à ce problème: en Allemagne, par exemple, le gouvernement et l'industrie viennent de mettre en place un projet de recherche dédié.

Il faudra aussi soumettre à une validation rigoureuse les capteurs qui alimentent le pilote automatique en informations critiques pour les décisions de conduite. Cela suppose le développement d'algorithmes de traitement du signal et de fusion des données prélevées assez efficaces pour distinguer tout au long du trajet les objets bénins des objets dangereux. Ils ne devront produire pratiquement aucun faux négatif (la non-identification d'objets dangereux), et très peu de faux positifs (l'identification comme dangereux d'objets en réalité inoffensifs, qui entraînerait un risque d'inutiles embardées et autres freinages brutaux).

Pour parvenir à ce niveau de performance du pilote automatique, les ingénieurs automobiles ne peuvent employer la force brute de la redondance (qui consiste à multiplier les capteurs susceptibles de donner l'alarme) qui caractérise les systèmes avioniques. En effet, à force de capteurs onéreux, ils risqueraient de rendre inabordables les pilotes automatiques pour véhicules routiers.

Se tourner vers l'intelligence artificielle n'est pas non plus une solution évidente. Certains ont proposé que des machines étudient par des techniques d'autoapprentissage des millions d'heures de conduite enregistrées. Une fois suffisamment formés pour diriger un véhicule, les pilotes automatiques obtenus par cette méthode continueraient à apprendre tout au long de leur cycle de vie. Toutefois, ce type d'apprentissage automatique crée des problèmes spécifiques. Même entraînés à l'identique, deux systèmes de conduite équipant le même modèle de véhicule accumuleraient, une fois sur la route, des expériences différentes, de sorte qu'ils finiraient par réagir différemment dans les mêmes conditions de circulation. Ils seraient imprévisibles.

Automatisation complète pas avant… 2075

J'ai longtemps affirmé que les systèmes de conduite de niveau 5 ne seraient pas réalisables avant 2040. Certains ont déformé mes propos en disant que c'était *pour* 2040. Aujourd'hui, j'ai changé de discours et les annonce désormais plutôt pour… pas avant 2075.

En fait, nous ne sommes même pas près d'avoir des automatisations de la conduite de niveau 3. Comment, en effet, recapter efficacement l'attention d'un conducteur en cas d'urgence? Est-ce même pensable s'il



Michael Shick

LA GOOGLE CAR est un prototype de voiture partiellement automatisée, à propulsion électrique, sans volant ni commandes pour un conducteur humain. L'ordinateur qui la pilote exploite les données d'un lidar, d'une caméra, de radars, d'un récepteur GPS et de capteurs sur les roues.

s'est endormi ? J'ai entendu les représentants de certains constructeurs automobiles dire que ce problème est si grave que cela les amène à renoncer à des automatisations de niveau 3. En fait, il est tout à fait possible que, en dehors des dispositifs d'assistance en situation d'embouteillage, l'automatisation de niveau 3 ne voie jamais le jour.

Bientôt des voitures hautement automatisées

Et pourtant, nous verrons quand même des voitures hautement automatisées bientôt. Presque tous les grands constructeurs et bureaux d'étude consacrent en effet des budgets importants au niveau 4, c'est-à-dire à la mise au point de systèmes de conduite automatique restreinte à des environnements particuliers et stables, du moins assez pour ne pas devoir dépendre des actions d'un humain faillible en cas d'urgence.

Plus le nombre de situations dans lesquelles peut se trouver effectivement un véhicule est réduit, plus sa conduite est automatisable. La ligne 14 du métro parisien est là pour nous le prouver. Si l'on dispose de voies séparées et sécurisées afin d'y rendre les conditions de déplacement stables, il est possible de faire fonctionner des systèmes de conduite automatique de façon presque parfaitement sûre.

C'est ainsi que, probablement, nous verrons apparaître au cours des dix prochaines années des systèmes de stationnement automatisés, auxquels nous abandonnerons notre voiture à l'entrée de parkings convenablement équipés, où ni véhicules non automatisés, ni piétons ne pourront circuler. Un système embarqué communiquera avec des capteurs répartis dans le parking afin de localiser une place disponible et d'y garer le véhicule.

Dans les zones piétonnes et commerciales, les campus et tous les lieux où les véhicules rapides peuvent être exclus, des navettes sans chauffeur pourront circuler lentement. Dans de tels environnements, des capteurs de capacité limitée suffiront à détecter les piétons et les cyclistes, tandis que les fausses détections seront de peu d'inconvénient. Le projet *CityMobil2* de taxi sans conducteur de la Commission européenne, qui vient d'être testé à La Rochelle, illustre à quoi pourra servir ce type de solution.

La mise en place de couloirs de bus séparés et de voies réservées aux camions permettra bientôt la circulation de véhicules très automatisés. La séparation entre ces véhicules et les autres simplifiera le problème de la détection des menaces, et donc les réactions automatiques. Afin d'économiser l'énergie, on envisage aussi de former des convois de camions et de bus dotés de la capacité de suivre automatiquement un premier véhicule classique. Des prototypes dotés de ce genre de capacité ont déjà été testés, notamment dans le cadre du projet californien PATH (*Partners for Advanced Transportation Technology*), du projet japonais Energy ITS (*Energy Saving Intelligent Transport Systems*) et du projet européen SARTRE (*Safe Road Trains for the Environment*).

Cependant, dans la décennie qui vient, l'automatisation de la conduite au niveau 4 prendra sans doute la forme d'autoroutes automatisées, où des véhicules seront automatiquement conduits sur les portions d'autoroute prévues à cet effet. Ils ne seront probablement utilisés que par beau temps, sur des tronçons d'autoroutes cartographiés dans le moindre détail. Ces portions de route pourraient même comporter des refuges où les véhicules se gareront automatiquement en cas de problème. La plupart des constructeurs automobiles travaillent d'arrache-pied à développer de tels systèmes. Volvo prévoit par exemple de tester en public 100 prototypes de véhicules ainsi équipés à Göteborg, en Suède. Cette automatisation est sans doute moins séduisante que la perspective d'avoir son propre chauffeur électronique, mais elle a l'avantage d'être possible – et même inévitable – dans un proche avenir. ■

BIBLIOGRAPHIE

Towards road transport automation : Opportunities in public-private collaboration, Résumé du IIIe symposium Europe-États-Unis sur la recherche sur le transport, Washington, 14 et 15 avril, 2015.

S. Shladover, **Technical challenges for fully automated driving Systems**, communication au 21e congrès mondial sur les systèmes de transport intelligents, Detroit, 7-11 septembre 2014.

S. Ashley, **Driving toward crashless cars**, *Scientific American*, n° 299, pp. 86-94, décembre 2008.

Qui a détruit la cité biblique de Hatsor ?

Amnon Ben-Tor

La conquête par les Hébreux de la « Terre promise » a-t-elle vraiment eu lieu ? Les fouilles de l'ancienne Hatsor, en Israël, éclairent cette grande question de l'archéologie biblique et brossent le tableau de l'une des principales cités de la région à l'âge du Bronze.

CES STÈLES VOTIVES proviennent du temple dit des stèles de Hatsor. Elles datent du XIV[e] siècle avant notre ère, peu avant la fin de la période cananéenne de la ville.

Pour les touristes qui visitent Israël, Hatsor n'est pas un nom aussi familier que Nazareth, Massada ou Césarée. Il s'agit pourtant d'un site archéologique majeur, identifié en 1875 et situé à une quinzaine de kilomètres au nord du lac de Tibériade, dans la vallée où coule le Jourdain *(voir la carte page suivante)*. Hatsor (orthographiée aussi Hazor ou Haçor, le *h* désignant ici une consonne gutturale) était une cité importante de l'âge du Bronze et de l'âge du Fer, des environs de 2600 jusqu'à sa destruction par les Assyriens en 732 avant notre ère.

Relatant la conquête de la Terre promise par Dieu à Moïse et son peuple, la Bible indique: «En ce temps-là, Josué revint et s'empara de Hatsor dont il tua le roi d'un coup d'épée. Hatsor était jadis la capitale [ou tête] de tous ces royaumes. On passa aussi au fil de l'épée tout ce qui s'y trouvait de vivant, en vertu de l'anathème. On n'y laissa pas âme qui vive et Hatsor fut livrée au feu.» (Josué 11:10-11).

De fait, Hatsor était à l'âge du Bronze la principale cité-État du sud de Canaan. Ce nom désignait une région correspondant aujourd'hui à Israël, à la Cisjordanie, au Liban et au sud-ouest de la Syrie. Canaan était parsemé de petits royaumes semi-indépendants. Quant aux Cananéens, il s'agissait de populations sémitiques préfigurant ce qu'on appellera plus tard les Phéniciens.

La période cananéenne de Hatsor prit fin avec la destruction subie par la cité au XIII[e] siècle avant notre ère. Et le passage de Hatsor de l'âge du Bronze à celui du Fer, vers 1200-1000, s'est accompagné d'un changement de population, les Cananéens laissant la place aux Israélites – une nouvelle population sémitique semi-nomade qui allait devenir monothéiste.

L'ESSENTIEL

- Hatsor, en Galilée, est un site des âges du Bronze et du Fer important pour l'archéologie biblique.
- C'était d'abord une grande cité-État cananéenne qui a connu son apogée au XVII[e] siècle avant notre ère.
- Elle a été détruite vers 1250 avant notre ère, probablement par les Israélites, comme l'affirme le récit biblique dans le livre de Josué.
- Hatsor a été réhabitée par des Israélites au XI[e] siècle avant notre ère, puis définitivement détruite par les Assyriens en 732 avant notre ère.





LE SITE DE HATSOR A ÉTÉ INSCRIT EN 2005 par l'Unesco sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité. La cité comportait une partie haute – le tell – et une partie basse. La cité basse, bien plus étendue, n'a pas été réoccupée depuis la fin de sa période cananéenne, au XIIIe siècle avant notre ère, lorsque Hatsor a été détruite et incendiée.



Le site archéologique de Hatsor se compose de deux parties. La première est le tell, qui domine les alentours d'une quarantaine de mètres. D'une superficie d'environ 6 hectares, cette partie constitue l'« acropole » ou « ville haute ». Au nord de cette dernière s'étend, sur quelque 70 hectares, la « ville basse », ou « enceinte fortifiée ». La « Grande Hatsor », qui regroupe les villes haute et basse, correspond à la Hatsor de l'âge du Bronze, celle de la période cananéenne, tandis que le site de l'âge du Fer, la Hatsor israélite, se limite à la ville haute.

On estime que la Grande Hatsor comptait environ 15000 habitants. À l'âge du Fer, où seule la ville haute a été de nouveau habitée, on estime la population à 1200-1500 âmes. Cette diminution en taille et en population ne signifie pas nécessairement que cette cité ait perdu en importance : la taille de la Hatsor de l'âge du Bronze, sa culture matérielle et les écrits de l'époque justifient pleinement l'expression « la capitale [ou tête] de tous ces royaumes » qui la désigne dans la Bible. Quant à la Hatsor de l'âge du Fer, elle occupe une place de choix dans les vifs débats actuels autour de la fiabilité historique des récits bibliques, en particulier le récit de la conquête supposée de Canaan par Josué.

Des sols fertiles, d'importantes ressources en eau et le contrôle d'une grande voie internationale étaient certainement autant de facteurs décisifs qui ont contribué à la prospérité de la ville et à son poids politique, économique et culturel. La route reliant le sud de Canaan aux cités-États et aux centres culturels situés plus au nord passe au pied du tell de Hatsor, se poursuit à travers la vallée de la Bekaa, au Liban, jusqu'à l'actuelle Damas et aux puissants centres de l'âge du Bronze (dont Qatna, Ebla et Yamkhad – l'actuelle Alep) et atteint Mari sur les bords de l'Euphrate, en direction de Babylone. Un embranchement de cette route mène vers le nord-ouest, jusqu'à la côte et aux cités telles que Tyr ou Sidon.

Position stratégique

Cet emplacement stratégique de Hatsor a été bien souligné par l'archéologue britannique John Garstang, qui a effectué des fouilles succinctes sur le site en 1928. Bien plus tard, dans les années 1950-1960, de nouvelles fouilles, sur cinq saisons et à grande échelle, ont été menées sous la direction de Yigael Yadin pour le compte de l'université hébraïque de Jérusalem. Compte tenu de leurs résultats, Yadin estimait qu'il faudrait pas moins de 500 autres saisons de fouilles (!) pour mettre au jour le site de Hatsor dans son intégralité. Cela donne une idée de nos lacunes dans la connaissance de cette cité et de l'étendue des découvertes qui restent à faire.

Vers la fin des années 1980, Joseph Aviram, président de la Société israélienne d'exploration, a relancé les fouilles de Hatsor. Depuis 1990, des fouilles ont été conduites chaque année sous la direction de l'auteur du présent article et, à partir de 2006, conjointement avec Sharon Zuckerman, de l'université hébraïque de Jérusalem, jusqu'à son décès prématuré en 2014.

Les nouvelles campagnes archéologiques se sont concentrées sur la seule ville haute, avec trois objectifs principaux. Le premier était de s'attaquer à des questions restées sans réponses satisfaisantes à l'issue des fouilles de Yadin. Quand exactement la ville basse a-t-elle été établie, faisant de Hatsor une force avec laquelle il fallait compter sur la scène internationale de l'époque ? Où se trouvent les archives de la cité ? Qui a détruit la Hatsor de l'âge du Bronze, et quand exactement ? Quand Hatsor s'est-elle relevée de ses ruines pour devenir la cité de l'âge du Fer, et qui a érigé ses premières fortifications ?

Le deuxième objectif était d'étendre les fouilles dans deux zones dont l'exploration

avait déjà été entamée par l'expédition Yadin : la principale zone au centre de la ville haute, et une autre zone plus au nord, au sommet d'une pente raide menant de la ville haute à la ville basse.

Le troisième objectif était (et est) de faire une place à Hatsor sur la carte touristique, en rendant le site aussi accessible et agréable que possible pour les visiteurs. Hatsor ne fait pas partie des attractions touristiques classiques et pourtant, sa visite s'impose dès lors qu'on s'intéresse aux liens entre l'archéologie, l'histoire et la Bible. Mais il est difficile pour le visiteur profane d'appréhender les vestiges de murs qu'il rencontre. Nous nous sommes donc donné la tâche de préserver et reconstituer les structures fouillées, au moins une pour chaque période représentée à Hatsor, afin d'aider le visiteur à interpréter ce qu'il voit. Cela n'a d'ailleurs pas qu'un intérêt touristique : ce sera aussi utile aux futures recherches.

Toutes ces campagnes de fouilles nous permettent de retracer les grandes lignes de l'histoire de Hatsor, de sa période cananéenne à la fin de sa période israélite.

Les vestiges de la plus ancienne implantation humaine à Hatsor sont limités à la ville haute. Ils sont profondément enfouis et recouverts par les vestiges des constructions ultérieures. Ce n'est qu'en de très rares endroits que nous avons pu fouiller assez en profondeur pour découvrir des vestiges du troisième millénaire.

Un centre urbain qui a décliné vers 2300

De minces vestiges d'habitations datant de l'âge du Bronze ancien II (la période 3000-2600 environ) ont été initialement découverts par l'expédition de Yadin. Par ailleurs, dans une des zones que nous avons fouillées a été mis au jour un système de murs massifs. Le répertoire céramique associé à ce bâtiment le date clairement de l'âge du Bronze ancien III (de 2600 à 2300).

Cette datation de ce qui était peut-être un palais ou un centre administratif conduit à réinterpréter la nature du village de Hatsor à cette époque. L'hypothèse selon laquelle il s'agissait d'un village rural (un gros village certes, comme les fouilles de Yadin l'avaient déjà établi) ne tient plus. En réalité, il devait s'agir d'un site urbain, où une structure publique de grandes dimensions s'ajoutait aux constructions résidentielles.

L'AUTEUR



Amnon BEN-TOR est professeur émérite à l'Institut d'archéologie de l'université hébraïque de Jérusalem, en Israël. Il dirige les fouilles de Hatsor depuis 1990.



FIGURINE EN BRONZE d'une divinité cananéenne, retrouvée dans le grand palais cérémoniel de l'âge du Bronze moyen (vers 1700-1450 avant notre ère). Le panthéon cananéen comportait plus d'une vingtaine de dieux.

Les fouilles effectuées au fil des ans sur de nombreux sites en Israël (Dan, Megiddo, Lakhish, Jéricho, etc.) ont mis en évidence l'importance de l'âge du Bronze ancien dans la région, et l'on emploie souvent le terme de « période urbaine » pour caractériser cette période. Nos fouilles ont montré que Hatsor faisait partie de cet ensemble de centres urbains. Qui plus est, les vestiges architecturaux ainsi que les mobiliers découverts (poteries, impressions de sceaux cylindriques, etc.) indiquent que, déjà à cette époque, Hatsor entretenait des relations culturelles et peut-être commerciales avec les régions situées plus au nord, voire jusqu'aux îles grecques.

À partir du XXIIIe siècle avant notre ère, à l'âge du Bronze intermédiaire (environ 2300 à 2000), on assiste en Canaan à un déclin de la culture urbaine qui avait commencé à s'y développer presque mille ans plus tôt et qui avait culminé à l'âge du Bronze ancien III. Ce déclin progressif s'est produit en même temps que l'affaiblissement des grandes puissances du Proche-Orient ancien, à savoir l'Égypte et la Mésopotamie. Il semble que la région ait alors sombré dans une période marquée par de fréquents changements de pouvoir et mouvements de populations. Ainsi, le centre urbain qu'était Hatsor a laissé place à un village dont on ne connaît pas encore l'étendue exacte. Les habitations étaient toutes constituées de murs de pierre peu épais, contrastant nettement avec la nature monumentale des bâtiments antérieurs ou postérieurs. Mais même en ces temps de déclin, les liens de Hatsor avec les régions au nord ont perduré, comme l'attestent les céramiques (tasses, bouilloires, gobelets, bouteilles...) retrouvées.

Âge d'or au XVIIe siècle

Après un millénaire pendant lequel l'implantation humaine à Hatsor est restée circonscrite à la ville haute, l'âge du Bronze moyen (1700 à 1450) a vu s'édifier la ville basse. S'étendant sur environ 70 hectares, soit plus de dix fois sa taille d'origine, Hatsor est alors devenue, vers le XVIIe siècle, l'une des plus grandes cités de la région.

À l'évidence, cela s'est accompagné d'une nette augmentation du nombre d'habitants. Des calculs fondés sur divers coefficients indiquent une population avoisinant les 15 000 habitants. Ce chiffre paraît aujourd'hui fort modeste, mais à l'époque, c'était l'équivalent de

la population de mégapoles modernes telles que Londres, Paris ou New York. Ainsi, la Hatsor de l'âge du Bronze moyen est devenue une véritable métropole et sa croissance en taille et en population est allée de pair avec une plus grande prospérité économique ainsi qu'un rôle politique régional majeur.

Dans la ville basse, l'expédition Yadin avait découvert des temples et des fortifications. Nos campagnes de fouilles au centre de la ville haute, elles, ont mis au jour quatre grands complexes architecturaux de cette époque : un temple, une enceinte formée de pierres dressées, un palais et un grenier souterrain *(voir l'encadré ci-contre)*.

Parmi les nombreux vestiges de l'âge du Bronze moyen découverts à Hatsor, figurent en particulier plus d'une douzaine de documents, écrits en akkadien sur des tablettes d'argile en écriture cunéiforme, et riches d'informations sur le langage, l'écriture, les lois, l'économie, l'administration, le culte, les relations politiques... Parmi eux, citons en particulier un fragment de recueil de lois, une archive de tribunal et une table de multiplications *(voir l'encadré page 58)*.

Les nouvelles fouilles indiquent clairement qu'au cours de la transition entre le Bronze moyen et le Bronze final, au XVe siècle, tout le centre de l'acropole a été complètement réorganisé, peut-être en raison d'un changement de dynastie régnante. Les précédentes installations cultuelles et civiles (le temple, l'enceinte des pierres dressées, le palais et le grenier souterrain) ont toutes été recouvertes d'une épaisse couche de terre de remblai. Un grand complexe cérémoniel a été construit au-dessus de ce remblai, au centre duquel a été érigé un énorme palais entièrement neuf *(voir l'illustration page 59)*. Sa superficie étant de près de 1 000 mètres carrés, c'est le plus grand bâtiment connu de cette période dans le pays. Il semble avoir été utilisé pendant environ deux cents ans, au cours desquels son plan n'aurait subi que des modifications mineures.

Les découvertes réalisées dans le palais cérémoniel sont riches et variées : des centaines de poteries d'argile, une coupe à tête de lion en faïence, une statue de divinité en basalte, les fragments de 18 statues égyptiennes (en particulier un fragment de sphinx dont subsistent les pattes antérieures et une partie de la base, avec le nom du roi égyptien Mykérinos gravé dessus), une boîte à bijoux décorée de plaques en os gravées de diverses figures et qui recelait plusieurs bijoux d'or, d'argent et de pierres semi-précieuses, des armes...

Vers la fin de l'âge du Bronze final, au XIIIe siècle, le palais cérémoniel montre de nets signes de détérioration et de déclin, et des signes comparables sont évidents ailleurs, dans la ville basse comme dans la ville haute.

Peu après, Hatsor a été entièrement dévorée par les flammes. L'incendie s'est accompagné d'une forte conflagration qui a dévasté le palais cérémoniel, faisant fondre les briques des murs de la grande salle, de même que certaines des céramiques qui s'y trouvaient.

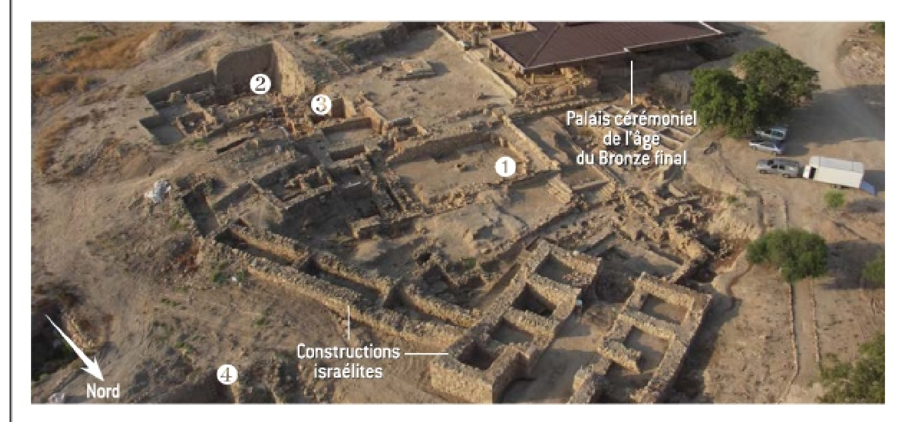
Il est tentant de penser que cet incendie est celui mentionné dans ces lignes de la Bible : « Mais Israël ne brûla aucune des villes situées sur des collines, à l'exception de Hatsor, qui fut brûlée par Josué » (Josué 11 : 13). Quand cette destruction a-t-elle eu lieu ?

Incendiée vers 1250 avant notre ère

Une date approximative a été établie d'après un fragment d'une table d'offrandes en pierre portant quelques hiéroglyphes égyptiens, trouvé parmi les débris de l'incendie. Les spécialistes qui l'ont examiné et déchiffré ont conclu que cette table a été apportée à Hatsor par un vizir de Ramsès II, un dénommé Rahotep. Par conséquent, l'inscription a été datée de la 40e année

QUATRE COMPLEXES ARCHITECTURAUX DE L'ÂGE DU BRONZE MOYEN

Les fouilles conduites par l'auteur dans la ville haute ont mis au jour, pour la période 1700-1450 avant notre ère, un temple, nommé Temple sud ❶, une enceinte de pierres dressées ❷, un palais ❸ et un grenier souterrain ❹.



❶ LE TEMPLE SUD

C'est une structure rectangulaire dans laquelle on entrait par le côté est. Des temples similaires ont été mis au jour sur d'autres sites, à l'est comme à l'ouest du Jourdain. Son plan traduit des influences du nord de Canaan (la Syrie actuelle), ce qui est aussi le cas d'autres structures de Hatsor, à la fois par leur plan général et par les détails de leur construction. La *favissa* (fosse rituelle) que l'on voit au centre du bâtiment *(ci-contre)* contenait les ossements de divers animaux ayant servi d'offrandes, ainsi que des dizaines de poteries d'argile *(page ci-contre)* utilisées pour le culte.



du règne de Ramsès II, soit à peu près entre 1270 et 1230 avant notre ère. Étant donné qu'il est improbable qu'une telle table d'offrandes ait été placée à Hatsor après la destruction de la cité, on en déduit que celle-ci n'a pas été détruite avant le milieu du XIII[e] siècle.

Qui donc était responsable de cette dévastation ? Cette question, comme celle de savoir qui était responsable de la destruction ou de l'abandon d'autres cités de la région à cette période, est centrale et constitutive de ce qu'on appelle aujourd'hui l'archéologie biblique. Pour y répondre, nous ne disposons pas d'autres sources que le texte de la Bible. Il nous faut procéder par élimination : examiner quelles forces de la région auraient pu détruire Hatsor.

Sur la liste des coupables potentiels, nous pouvons éliminer les Hittites et les Babyloniens, qui étaient à l'époque trop éloignés et trop faibles. Une candidate plus probable est l'armée égyptienne, qui était rentrée défaite et humiliée de la bataille de Qadesh (en Syrie, au nord du Liban actuel) contre les Hittites, vers 1274. Mais cette possibilité est à éliminer pour deux raisons. Tout d'abord, il n'y a aucune référence à la conquête de Hatsor dans les documents de l'époque de Ramsès II, souverain d'Égypte en ce temps-là. Ensuite, comme l'a montré l'égyptologue britannique Kenneth Kitchen, l'armée égyptienne n'est pas passée à proximité de Hatsor au retour de Qadesh : elle a regagné l'Égypte en passant par Sidon, d'où elle a traversé la Méditerranée.

Les Peuples de la mer (en l'occurrence les Philistins) auraient également été de potentiels auteurs de la destruction de Hatsor. Toutefois, Hatsor est située très à l'intérieur des terres, loin de la zone côtière qui intéressait les Peuples de la mer. Par ailleurs, ces derniers avaient un répertoire céramique unique, et pas un seul tesson susceptible d'être associé à ces poteries n'a été retrouvé parmi les centaines de milliers de fragments collectés au fil des ans à Hatsor.

Une autre cité de l'âge du Bronze, peut-être ? Mais quelle autre cité aurait pu défier la puissante Hatsor, la « tête de tous ces royaumes » ?

Dernière proposition : la population de Hatsor elle-même, en rébellion contre la classe



❷ L'ENCEINTE DES PIERRES DRESSÉES

À une quarantaine de mètres au sud du Temple sud se trouvait un lieu de culte à ciel ouvert, comprenant une trentaine de pierres dressées, non travaillées, que l'on a retrouvées éparpillées sur environ 25 mètres carrés *(ci-dessus)*. Au côté de chacune d'entre elles, généralement du côté est, se trouvait une pierre plate, sans doute destinée à accueillir les offrandes. Des milliers d'ossements animaux brisés étaient dispersés autour des pierres dressées : os de moutons, chèvres, cochons, cervidés, chiens, poissons, et même un os de lion, témoins d'une activité cultuelle intense qui s'est poursuivie sur une longue période. Ainsi, deux centres cultuels, proches l'un de l'autre, équipaient l'acropole de Hatsor à l'âge du Bronze moyen. Quelles divinités vénérait-on dans ces deux centres ? S'agissait-il de divinités différentes, ou de la même ? On l'ignore.

❹ LE GRENIER SOUTERRAIN

Non loin du temple et du palais, un complexe souterrain constitué de plusieurs énormes salles a été mis au jour, dont une seule (d'une taille d'environ 6 mètres par 10) l'a été entièrement. Les murs de cette dernière sont très bien préservés et font 4 mètres de haut. Aucune entrée n'ayant été découverte au niveau des murs des différentes salles, on en déduit que l'on y pénétrait par le haut, probablement au moyen d'échelles. Les résidus organiques découverts au sol et dans les plâtres recouvrant les murs suggèrent que l'on y stockait des denrées agricoles. Si ces salles ont effectivement servi de grenier, alors elles pouvaient contenir environ 600 mètres cubes de récoltes. Une telle capacité de stockage est considérable : sachant que l'on estime la population de la ville haute à 1000 ou 2000 habitants au plus, ces réserves souterraines auraient suffi à pourvoir à ses besoins en céréales pendant une année et demie !

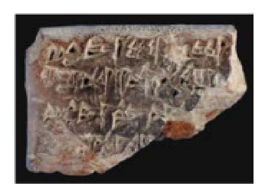


❸ LE PALAIS

Entre le Temple sud et l'enceinte des pierres dressées ont été mis au jour des vestiges de murs de pierre épais d'environ 2 mètres. Il s'agit sans doute des restes du palais de l'un des rois de Hatsor au cours de l'âge du Bronze moyen. Malheureusement, seule une petite partie de ce palais a été mise au jour : son prolongement vers l'ouest est enfoui sous la cour du palais cérémoniel de l'âge du Bronze final. Pour mettre au jour l'intégralité du palais de l'âge du Bronze moyen, il aurait fallu creuser la cour et le palais cérémoniel qui le recouvrent. Face au dilemme de révéler toute l'étendue du palais de l'âge du Bronze moyen ou de préserver le palais et la cour supérieurs, la seconde option a été préférée.

DE PRÉCIEUX DOCUMENTS DE L'ÂGE DU BRONZE MOYEN

Parmi la douzaine de documents trouvés à Hatsor et datant de la période allant d'environ 1700 à 1450 avant notre ère, trois sont particulièrement intéressants.



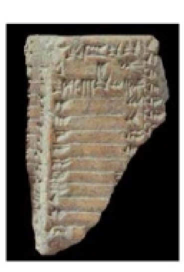
Un recueil de lois

Ce fragment d'un recueil de lois est le seul vestige de ce type découvert jusqu'ici au Levant. Il s'agit d'un simple fragment d'une tablette plus grande, dont on espère découvrir davantage de pièces. La tablette traite de la compensation due au propriétaire d'un esclave en cas d'éventuels dommages corporels subis par cet esclave pendant qu'il est loué à une tierce partie. La loi en question ressemble beaucoup à celle qui traite de la même question dans le Code (babylonien) de Hammurabi, où il est spécifié : « Si un homme détruit l'œil de l'esclave d'un homme ou casse un os à l'esclave d'un homme, il devra s'acquitter de la moitié de son prix. » Et que l'on peut mettre en regard de la loi biblique s'appliquant à une situation similaire : « Si un homme frappe l'œil de son esclave, homme ou femme, et qu'il lui fasse perdre l'œil, il le mettra en liberté, pour prix de son œil ; et s'il fait tomber une dent à son esclave, homme ou femme, il le mettra en liberté, pour prix de sa dent (Exode, 21 : 26-27)...



Une archive de tribunal

Ce document concerne trois agents du tribunal qui présentent une affaire devant le roi. L'accusée est une femme qui possède une quantité considérable de biens, à Hatsor et dans les environs. Plusieurs points intéressants sont à noter. Les noms sont clairement sémitiques. Deux des plaignants, par exemple, ont des noms à composante théophore (c'est-à-dire évoquant un dieu) : Hanuta renvoie à la déesse Anat, et Addu au dieu Hadad. Par ailleurs, l'affaire a été défendue devant le roi, très probablement à Hatsor, mentionnée dans le document, ce qui est un indice de plus sur l'identité du site. Enfin, une femme fait partie des plaideurs, ce qui est très inhabituel. Non seulement cette femme possède de nombreux biens et se représente elle-même devant les tribunaux (elle n'est pas représentée par un mari, un père ou un quelconque autre parent), mais elle obtient gain de cause !



Une table de multiplications

Cette tablette fait partie d'un prisme à quatre côtés. Ce type de tablettes était utilisé dans les écoles de scribes de diverses cités mésopotamiennes, où l'on apprenait à écrire les nombres et à effectuer divers calculs. La tablette de Hatsor utilisait un système sexagésimal (c'est-à-dire de base 60), comme en Mésopotamie. L'analyse de l'argile montre que le prisme a été préparé sur place. Une autre tablette découverte dans les années 1950 par l'expédition Yadin, sur laquelle sont inscrits plusieurs termes en sumérien avec leur traduction en akkadien, constitue un indice supplémentaire de l'existence à Hatsor d'une école de scribes.

dirigeante de la cité. Dans cette hypothèse, la chute de la Hatsor de l'âge du Bronze final résulterait de circonstances sociales, politiques, culturelles et idéologiques plutôt que d'un événement externe. Cependant, cette hypothétique révolte de la propre population de la ville n'est pas corroborée par les données dont nous disposons.

Il n'était pas rare dans l'Antiquité que des émeutes fassent des dégâts et se traduisent à l'occasion par des changements de pouvoir, mais ce type de conflit était invariablement le résultat de rivalités au sein de la famille régnante ou de tentatives de coup d'état militaire. Pas un seul cas de soulèvement civil contre le pouvoir en place, tel qu'avancé pour Hatsor, n'est connu pour l'époque antique. De plus, si la destruction de la Hatsor de l'âge du Bronze était due à une rébellion des habitants de la ville contre ses dirigeants, comment expliquer que Hatsor ait été abandonnée pendant 150 à 200 ans après sa destruction ? Si la cité avait été détruite par ses propres habitants, pourquoi auraient-ils quitté les lieux après leur victoire ?

Des empires affaiblis, une région devenue vulnérable

Si les responsables de la destruction de la Hatsor de l'âge du Bronze n'étaient ni les Égyptiens, ni les Peuples de la mer, ni une cité cananéenne rivale, ni la population de Hatsor elle-même, qui reste-t-il à soupçonner ? Sur la stèle de la Victoire laissée dans son temple funéraire près de Thèbes par le pharaon Mérenptah (fin du XIIIe siècle avant notre ère), ce souverain fait la liste de plusieurs cités qu'il a conquises en Canaan et mentionne aussi Israël, accompagné d'un signe faisant référence à un groupe ethnique : « Israël est détruite, sa semence n'est plus. » C'est la plus ancienne occurrence connue du nom Israël, et elle indique clairement qu'un groupe nommé ainsi existait à l'époque et avait probablement atteint la région quelque temps avant d'être défait par le pharaon d'Égypte.

Il ne faut pas considérer l'historiographie biblique, en particulier les récits contenus dans les livres de Josué, Juges, Samuel et Rois, comme des récits impartiaux et exacts des événements relatés. Après tout, ils ont été délibérément écrits avec une orientation théologique et, dans une certaine mesure, politique. Néanmoins, ces récits bibliques contiennent souvent des éléments de vérité historique, et celui sur la chute de Hatsor en fait probablement partie.

Nous ne disposons d'aucun indice suggérant qu'un autre groupe que les Israélites ait pu être à l'origine de la chute de Hatsor. Leur présence dans la région à l'époque est attestée par ailleurs, et c'est le seul groupe dont l'implication est relatée dans un récit explicite. Cette destruction devrait donc leur être attribuée, jusqu'à preuve du contraire.

Comment les Israélites, qui constituaient à l'époque une population nomade assez insignifiante, ont-ils pu vaincre des cités cananéennes puissantes telles que Hatsor ? Il existe dans l'histoire d'autres exemples

où des tribus nomades ont triomphé de royaumes considérés (à tort) comme puissants, notamment la chute de l'Empire romain face aux tribus germaniques « barbares » et la conquête de l'Empire byzantin par les Arabes. Dans les deux cas, ces empires étaient affaiblis et appauvris par des conflits internes, la corruption et le déclin économique.

C'était sans doute le cas de la région de Canaan aux XIII[e] et XII[e] siècles avant notre ère. Au cours des trois siècles de domination égyptienne, le pays avait été complètement vidé de ses ressources. Des incursions répétées de l'armée égyptienne, destinées à mater les rébellions qui éclataient de temps à autre, avaient en effet dévasté l'agriculture : l'armée se nourrissait de ce qu'elle trouvait sur place et mettait souvent le feu au reste.

La fin de l'âge du Bronze final est caractérisée par une crise qui a frappé toute la région, conduisant au déclin des puissances d'autrefois (Égypte, Assyrie, Hittites...). Ce vide a été exploité par divers groupes ethniques, dont les Grecs, qui se sont implantés en Asie Mineure à cette période, les Araméens, qui ont colonisé certaines régions de Syrie, et les Arabes, qui se sont infiltrés dans la péninsule Arabique. Le sud de Canaan est donc devenu vulnérable, et les Israélites se sont simplement trouvés au bon endroit au bon moment…

Première implantation israélite vers 1050

Pendant près de deux siècles, le site où se dressait autrefois la Hatsor de l'âge du Bronze est resté en ruines, jusqu'à ce qu'il soit repeuplé au milieu du XI[e] siècle. Même alors, seule la ville haute a été repeuplée. Les vestiges du premier village israélite à Hatsor



LES VESTIGES DU PALAIS CÉRÉMONIEL de l'âge du Bronze final (1450 à 1250 avant notre ère) sont aujourd'hui recouverts d'une toiture, pour les préserver des intempéries et pour le confort des visiteurs. Le plan du monument *(a)* montre notamment la cour *(1)*, le porche *(2)* et la salle du trône *(3)*. Parmi les nombreux objets mis au jour dans ce palais : une statue de bronze de souverain cananéen *(b)*, un fragment de statue de roi égyptien *(c)*, de grandes jarres *(d)*, un récipient en basalte avec une divinité debout *(e)*.

sont très maigres, ce qui signifie que la société correspondante commençait tout juste à s'organiser. On n'a retrouvé que de rares vestiges de murs, ce qui suggère que la population vivait dans des huttes ou des tentes, comme les actuels Bédouins.

En fait, la plupart des vestiges découverts sont des fosses, retrouvées par dizaines, éparpillées aléatoirement sur toute la zone. D'environ 1,5 mètre de diamètre et de profondeur, elles étaient remplies de fragments de poteries et de récipients en terre, de cendres et de terre. Chaque fosse était fermée par des pierres. On a retrouvé des fosses similaires, datant de la même époque (XII[e] et XI[e] siècles avant notre ère) – la « période d'implantation israélite » –, dans de nombreux sites de la région, mais on ignore leur fonction exacte.

En plus des activités quotidiennes, des pratiques religieuses cultuelles avaient cours à Hatsor, comme le prouvent les pierres dressées trouvées en divers endroits du site. À une vingtaine de mètres à l'est du palais cérémoniel en ruines, nous avons ainsi découvert une installation constituée d'une stèle de basalte juxtaposée d'une pierre plate servant de table d'offrandes, et dix pierres dressées en basalte, de 10 à 15 centimètres de haut, disposées en cercle.

Comment expliquer ces lieux de culte? Quelle divinité y vénérait-on? Nous n'avons pas de réponse claire à ces questions. Certains archéologues ont proposé d'y voir un « culte des ruines ».

LA MAISON ISRAÉLITE typique, à l'âge du Fer. Le rez-de-chaussée était dévolu à la cuisine, au stockage des aliments et aux animaux. Le couchage se faisait à l'étage, voire sur le toit en cas de forte chaleur. Cette reconstitution est due à Lawrence Stager, archéologue spécialiste d'Israël à l'université Harvard.

En effet, presque deux cents ans se sont écoulés entre la destruction de Hatsor et les premières implantations israélites sur le site, mais pendant ce laps de temps, les ruines de l'ancienne cité n'ont pas disparu et bien souvent, les nouveaux habitants vivaient tout près d'elles. Ceux qui ont construit le lieu de culte au voisinage immédiat des ruines du palais cérémoniel édifié au XV[e] siècle pouvaient voir ces vestiges: l'amas de ruines dominait les alentours de deux mètres ou plus et est resté dressé, abandonné, jusqu'à la fin du village de l'âge du Fer. Respect, crainte et interdiction sont trois concepts susceptibles d'expliquer l'aménagement de lieux de culte face aux ruines. Cela expliquerait aussi le temps écoulé entre la destruction des cités de l'âge du Bronze – Hatsor, Lakhish, Jéricho et d'autres – et les nouvelles implantations israélites à l'âge du Fer.

Un village fortifié

Vers le milieu du X[e] siècle, la société seminomade qui résidait à Hatsor depuis près d'un siècle a fait place à une communauté plus sédentaire. La preuve la plus claire en est l'édification de fortifications. Le nouveau village, qui occupait la moitié ouest de la ville haute, était circonscrit par un mur double (un « mur de casemate ») et une entrée dite à triple tenaille *(voir la photographie ci-dessous)*, dont le plan est très



L'ENTRÉE « À TRIPLE TENAILLE » ET LE MUR DOUBLE dont était entouré le village israélite qui s'est constitué vers le milieu du X[e] siècle avant notre ère. Cette entrée est très similaire aux portes de Megiddo et Gezer, deux autres cités israélites d'importance.

similaire aux portes de Megiddo et Gezer, deux autres importantes cités israélites.

La Hatsor du Xe siècle était un village assez modeste. Un changement majeur s'est produit au IXe siècle. Hatsor a alors prospéré sous la dynastie des Omrides et est devenue un centre administratif de premier plan du royaume israélite. Toute l'acropole, et pas seulement la partie ouest, était alors habitée. De nouvelles fortifications l'encerclaient, tandis qu'un imposant système d'approvisionnement en eau, une citadelle et une série de bâtiments publics ont été construits.

Parmi ces derniers, les bâtiments de stockage sont particulièrement intéressants. Près de quarante structures similaires ont été mises au jour en divers sites d'Israël. Tous ces bâtiments présentent un même plan : un cadre rectangulaire, avec deux rangées de colonnes divisant la structure en trois dans le sens de la longueur, la salle centrale étant plus haute de plafond que les deux salles latérales. La différence de hauteur permettait à la lumière et à l'air de pénétrer dans la structure, dont les murs étaient vraisemblablement dépourvus de fenêtres *(voir l'illustration ci-dessus)*.

La fonction de ces structures était sujette à controverse, et elle continue à l'être dans une certaine mesure. La structure que nous avons découverte au centre de Hatsor servait clairement au stockage, en particulier parce qu'un grand récipient, enterré dans le pavage de pierre, s'est révélé contenir une quantité notable de blé carbonisé.

Une autre installation de stockage a été découverte à sa proximité : une fosse pavée et tapissée de pierres, dont la capacité (15 mètres cubes) indique que son contenu était destiné à une utilisation publique et non privée. Cette fosse servait très vraisemblablement de silo. Des silos similaires, datant de la même période, ont été retrouvés à Beth Shemesh (à l'ouest de Jérusalem) et à Megiddo.

Des bâtiments de stockage de céréales ont été découverts à Tel Hadar, 'Ein Gev et Bethsaida, trois localités situées sur les rives du lac de Tibériade. Avec ceux de Hatsor, ils attestent que d'énormes quantités de céréales étaient stockées dans une toute petite région dans le nord de l'Israël actuel. Cela témoigne de la grande importance économique de cette région, aux sols fertiles et où l'eau n'est pas rare.

UN BÂTIMENT DE STOCKAGE – probablement de céréales – découvert au centre de Hatsor témoigne de l'importance économique de la cité israélite. Comme de nombreux autres bâtiments similaires mis au jour en Israël, il était divisé en trois par deux rangées de colonnes, la partie centrale étant plus haute de plafond et munie d'ouvertures, pour l'aération et l'éclairage.

Alors que la Hatsor de l'âge du Bronze entretenait d'étroits liens économiques, politiques et culturels avec les régions situées plus au nord, Hatsor était, au cours de l'âge du Fer, en relation surtout avec la région côtière libanaise. Ces liens avaient commencé à se tisser à l'époque de la Monarchie unifiée, celle de David et Salomon. Ils ont perduré à l'époque du royaume d'Israël, lorsqu'il s'est séparé de celui de Juda. Des preuves de ces liens avec la Phénicie proviennent de divers aspects des constructions publiques du site (méthode de construction, éléments architecturaux), ainsi que des quelques objets d'art (scarabées de pierre, amulettes en faïence, os sculptés, manches en ivoire...) découverts dans les différents bâtiments résidentiels.

Pour finir, on ne saurait discuter de la Hatsor de l'âge du Fer et de son importance sans évoquer la relation entre les trouvailles archéologiques et les textes de la Bible. La question de savoir si oui ou non Hatsor a été conquise par les Israélites reste sans réponse concluante, mais la destruction finale de la cité par le roi assyrien Teglath-Phalasar III en 732 avant notre ère (mentionnée dans Rois II 15:29) est incontestée. Parfois, on peut établir un lien entre les vestiges découverts à Hatsor (par exemple la porte à triple tenaille dont, comme celles de Megiddo et Gezer, le passage Rois I 15:9 attribue l'initiative à Salomon) et ce qui est relaté dans l'Ancien Testament. Ainsi, l'importance de la Hatsor de l'âge du Fer tient avant tout à la possibilité de tester la fiabilité historique de certains des récits bibliques.

Une précieuse fenêtre sur l'âge du Fer israélite

Les deux cents ans d'existence de la Hatsor de l'âge du Fer, depuis sa refondation (probablement sous le règne de Salomon) jusqu'à sa destruction (et la déportation de ses habitants en Assyrie, selon la Bible) sont représentés par six strates archéologiques et leurs subdivisions. C'est la séquence de peuplement la plus détaillée et la plus complète de tous les sites de l'âge du Fer sur le territoire israélien. On peut donc s'attendre à ce que les prochaines saisons de fouille livrent de nombreuses et passionnantes informations supplémentaires sur cette cité et sur cette époque capitale pour la formation du peuple hébreu. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Ben-Tor, **Hazor - Canaanite Metropolis, Israelite City**, Israel Exploration Society, 2016.

A. Ben-Tor, **Did Israelites destroy Hazor ?**, *Biblical Archaeology Review*, vol. 39(4), pp. 26-36 et pp. 58-60, 2013.

A. Ben-Tor, **Hazor in the tenth century B. C. E.**, *Near Eastern Archaeology*, vol. 76(2), pp. 105-109, 2013.

W. Horowitz, **Hazor : A cuneiform city in the West**, *Near Eastern Archaeology*, vol. 76(2), pp. 98-101, 2013.

■ SUR LE WEB

The Hazor Excavations Project, université hébraïque de Jérusalem : http://hazor.huji.ac.il/

Plongée dans les eaux douces de **Guyane**

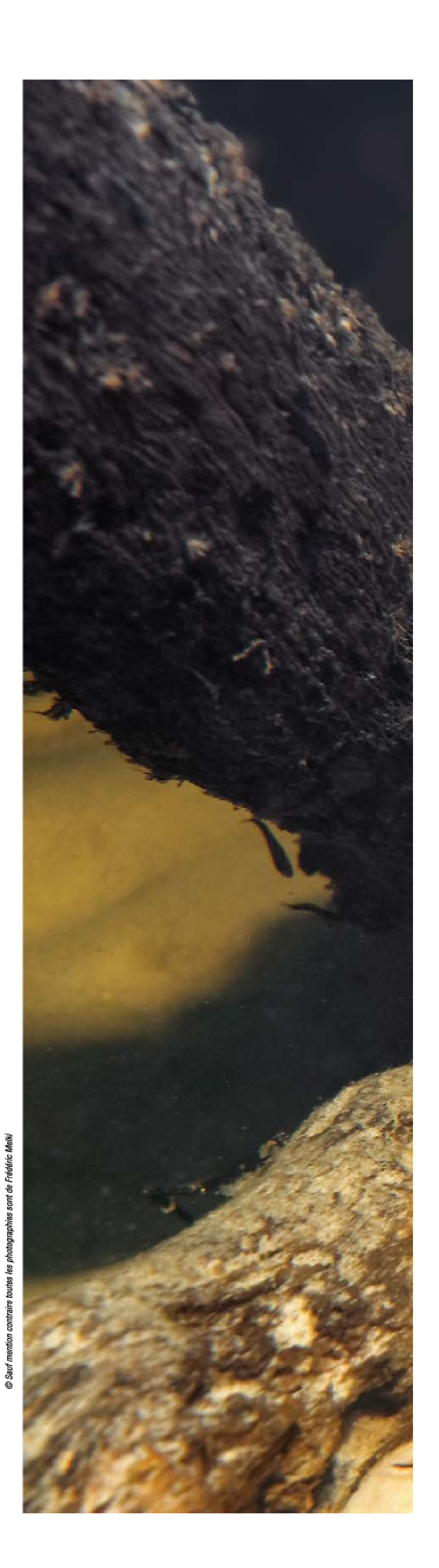
Comme d'autres régions tropicales, la Guyane française abrite une faune et une flore très riches. Avec près de 450 espèces, ses poissons d'eau douce forment l'un des groupes les plus diversifiés – un univers aussi spectaculaire que méconnu.

Frédéric Melki

Tout le monde a en tête des images des récifs coralliens des mers du Sud, mais rares sont ceux qui imaginent ce que l'on voit dans les dédales de cours d'eau des forêts amazoniennes. Et pourtant, que de merveilles et d'ambiances mystérieuses ! L'eau y est souvent claire, bien que généralement teintée d'or par les tanins de la forêt. Et l'on y trouve une incroyable diversité de milieux naturels et de paysages subaquatiques. Ici, les arbres tombés dans l'eau connaissent une seconde vie et deviennent le réceptacle de toute une vie aquatique ; les poissons circulent et se reproduisent entre les branchages, tels des oiseaux dans une forêt rêvée. Ailleurs, ce sont des rapides où les eaux tumultueuses érodent, depuis des millions d'années, d'énormes chaos de granite. Ailleurs encore, de petites rivières à fond de sable, peuplées de milliers de petits poissons, sont de véritables aquariums à ciel ouvert.

La grande variété des milieux d'eau douce ou saumâtre s'accompagne d'une grande diversité d'espèces de poissons (entre 400 et 450 espèces recensées, soit 6 à 7 fois plus qu'en France métropolitaine), de formes et de modes de vie. Certaines espèces, comme le poisson-hachette, vivent uniquement en surface. D'autres, comme les corydoras, passent leur vie à fouiller le sable avec leurs petits barbillons. On y croise de grands prédateurs, telle la torche tigre qui atteint 1,3 mètre, ou de minuscules espèces ne dépassant pas 3 centimètres de long et très prisées en aquariophilie. Certaines espèces constituent un danger pour l'homme, telles les raies *Potamotrygon*, dotées d'un aiguillon venimeux, ou les anguilles électriques, capables de produire des décharges de plus de 700 volts.

Les photographies présentées ici, prises au fil de plusieurs années de plongées en milieu naturel, montrent un petit échantillon de ce trésor subaquatique – un trésor inestimable et fragilisé par les activités humaines, l'orpaillage notamment. ■





CRENICICHLA MULTISPINOSA

Cette femelle en parure de garde parentale surveille ses alevins dans une zone sablo-vaseuse de la crique (petite rivière) Voltaire, dans le bassin du Maroni. Les cichlidés-brochets fréquentent des milieux très variés, mais ils sont particulièrement abondants dans ces zones bien oxygénées, calmes et qui offrent de nombreuses cachettes. L'ocelle situé à la base de la queue du poisson constitue un leurre pour les prédateurs. Ces derniers, pensant qu'il s'agit de l'œil, attaquent le poisson par l'arrière et sont surpris de le voir s'enfuir dans la direction opposée.



CRENICICHLA SAXATILIS

Cette femelle surveille sa ponte dans une crevasse de la berge d'une crique, dans la réserve naturelle Trésor (région de Kaw-Roura-Régina). Elle arbore sa tenue typique et vive de garde parentale, qui avertit les autres poissons de son extrême agressivité à cette période. Comme tous les *Crenicichla*, c'est un redoutable prédateur qui se nourrit de poissons parfois presque aussi gros que lui.



PHENACOGASTER WAYANA

Ce poisson de forme losangique mesure moins de 5 centimètres et présente une merveilleuse transparence. Trois espèces du genre sont connues en Guyane.



ACESTRORHYNCHUS MICROLEPIS

Malgré sa petite taille (moins de 20 centimètres), le petit dent-chien est un féroce prédateur qui ne laisse aucune chance aux petits poissons qu'il chasse. Ses fortes dents acérées, mais aussi ses opercules dentés, retiennent inexorablement la proie mordue.



PARODON GUYANENSIS

Ce banc de *Parodon* parfaitement synchronisés broute le tapis d'algues recouvrant une roche ensoleillée, sous une eau peu profonde et très rapide (crique Petit-Laussat, bassin de la Mana). La coloration très particulière, dite disruptive, de ces poissons longs d'une dizaine de centimètres brise leurs silhouettes, ce qui les dissimule aux yeux d'un prédateur : le point noir très visible de la nageoire dorsale éloigne le regard de l'œil du poisson et les chevrons noirs qui se superposent aux rayures longitudinales font qu'on distingue mal un individu d'un autre.



GASTEROPELECUS STERNICLA

Les poissons-hachettes (deux espèces en Guyane) ont une silhouette caractéristique avec un ventre très arrondi et aplati latéralement, et des nageoires pectorales très longues. Ils sont capables de déjauger et de réaliser des vols planés de plusieurs mètres afin de fuir un prédateur. *G. sternicla* (long de 4 centimètres environ) est de loin le poisson-hachette le plus commun en Guyane. Il fréquente les marais et les zones calmes des criques. En saison des pluies, il rejoint en grand nombre les forêts marécageuses. Sa bouche dirigée vers le haut et son dos rectiligne indiquent qu'il s'agit d'un poisson de surface.

SERRASALMUS RHOMBEUS

Le piranha noir, long d'environ 50 centimètres, est un carnivore. Mais les piranhas comptent de nombreuses espèces végétariennes. Et dans des conditions normales, les piranhas, même carnivores, ne présentent aucun danger. Il n'existe en Guyane aucun cas documenté d'attaque grave sur l'homme.

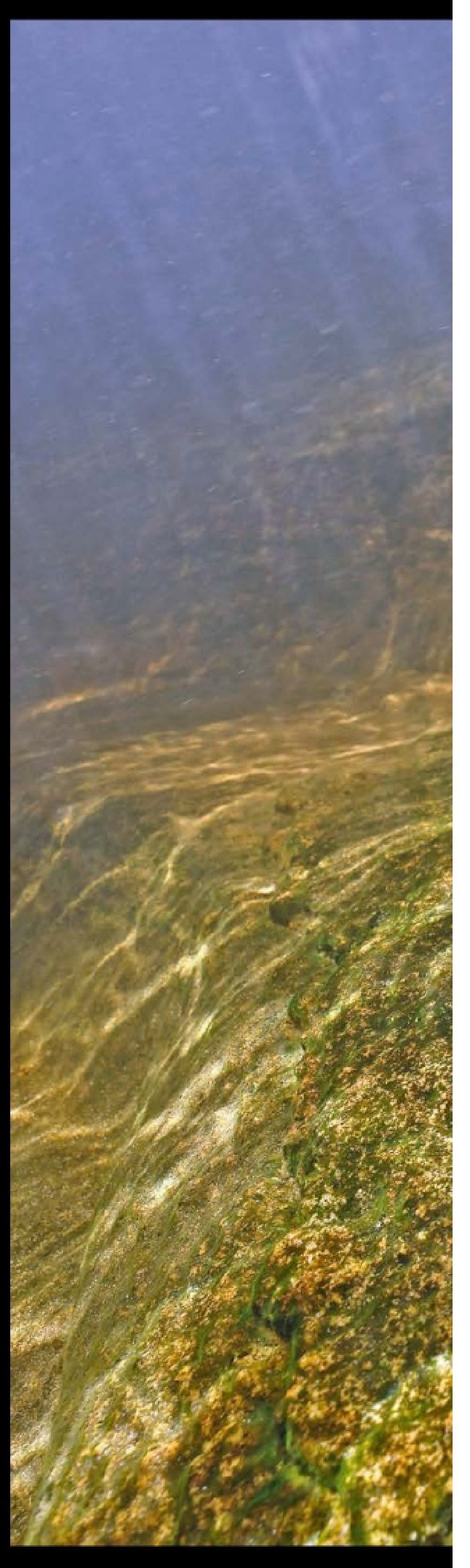


© Pierre-Yves Le Bail



ANABLEPS MICROLEPIS

Un bond spectaculaire à l'approche de la pirogue... Les *Anableps*, couramment nommés quatre-yeux ou gros-yeux, abondent à l'embouchure des fleuves guyanais. Leurs yeux, divisés en deux, sont capables de regarder à la fois sous l'eau et au-dessus. Autre particularité, les mâles ont un organe copulateur qui ne peut se déployer que dans un sens, vers la droite ou vers la gauche. C'est la même chose chez les femelles, dont l'orifice génital peut être situé à droite ou à gauche. Les mâles gauchers ne peuvent ainsi s'accoupler qu'avec des femelles droitières, et vice-versa.





GUYANANCISTRUS BREVISPINIS

Ce poisson-chat cuirassé de la famille des Loricariidae a une taille d'une quinzaine de centimètres. Il semble surveiller son territoire sur de vastes dalles rocheuses d'une petite crique du bassin versant du fleuve Mana. Ces poissons sont très territoriaux, car ils trouvent sur quelques mètres carrés tous les éléments nécessaires à leur vie : abris, nourriture, lieu de reproduction. Comme la plupart des membres de la famille des Loricariidae, cette espèce est très appréciée des aquariophiles.



PSEUDOPLATYSTOMA FASCIATUM

La torch tigre (ou torche tigre) est un gigantesque poisson-chat dont le poids peut atteindre 70 kilogrammes. Ce splendide prédateur nocturne recherche ses proies avec ses immenses barbillons tactiles. Il est très prisé des pêcheurs dans l'ensemble de l'Amazonie.

CORYDORAS SP.

Les corydoras sont des petits poissons-chats sud-américains qui passent leur vie à fouiller le sable à l'aide de leurs barbillons. Cette espèce, pourtant rencontrée non loin de Cayenne, n'est pas encore identifiée. Il s'agit sans doute de l'une des multiples espèces inconnues et non décrites qui peuplent les cours d'eau de Guyane. Les corydoras sont parmi les poissons les plus recherchés par les aquariophiles.



POTAMOTRYGON HYSTRIX

Les raies d'eau douce, dont la queue est dotée d'un ou plusieurs dards venimeux, constituent le principal danger lié aux poissons en Guyane. Elles fréquentent des milieux sableux, propices à la baignade ou à la marche dans l'eau. Leur habitude de s'enfouir dans le sable et leur robe mimétique conduisent à un risque très réel de marcher dessus.





Frédéric MELKI, docteur en pharmacie et naturaliste photographe, est président-directeur général de Biotope, maison d'édition et entreprise d'ingénierie écologique.
Les photographies de ce portfolio sont extraites de son livre *Poissons d'eau douce de Guyane – plongée dans les eaux de l'Amazonie française* (Biotope, 2016).

Comment on a sécurisé

Jean-Jacques Quisquater et Jean-Louis Desvignes

Dans les années 1980, on s'est aperçu que la carte à puce n'était pas sans faille. Un mariage avec la cryptographie, domaine alors en pleine renaissance, s'imposait d'urgence…

la carte à puce

Depuis son lancement il y a quatre ans, le paiement sans contact connaît un succès croissant. Trois milliards de transactions ont eu lieu en Europe avec une carte Visa sans contact entre mai 2015 et mai 2016, soit près de trois fois plus qu'un an plus tôt, a annoncé la société Visa Europe. Dans les commerces de proximité, une transaction sur cinq est effectuée par ce moyen, contre une sur soixante en 2013. En France, l'adoption de ce mode de paiement a augmenté de 230 % en un an, conduisant à 194 millions de transactions sur douze mois, concernant plus de 2 milliards d'euros. La confiance accordée à ce mode de paiement est grande. Pourtant, fondé sur une communication en champ proche (un lecteur communique par ondes radio avec la puce de la carte bancaire à l'aide d'une minuscule antenne si la distance qui les sépare est inférieure à 10 centimètres), il est loin d'être inviolable : certes, des précautions empêchent que l'on vide votre compte (plafond de retrait à 20 euros, nombre de paiements sans contact limité par jour...), mais aucune mesure de sécurité n'a été installée au sein de la carte pour bloquer ce type d'attaque. Rien non plus n'empêche un hacker d'intercepter vos données bancaires en passant un lecteur près de la poche où vous conservez votre carte.

L'ESSENTIEL

- À son apparition dans les années 1980 en France, la carte à puce était considérée comme inviolable.
- Mais bien vite, les premières attaques sont venues et il a fallu sécuriser davantage cette invention, d'autant que le ministère de la Défense envisageait son utilisation pour renforcer la sécurité de certains équipements de chiffrement.
- A commencé alors une course pour intégrer à la puce, malgré sa faible capacité, des algorithmes de cryptographie suffisamment puissants.

Un million de dollars sur un plateau

En fait, le paiement sans contact n'est que le dernier rebondissement d'une longue histoire, celle de la sécurisation de la carte à puce, dont nous avons été tous deux des témoins et acteurs, l'un (Jean-Jacques Quisquater) pour la partie technologique, l'autre (Jean-Louis Desvignes) en tant que gardien de l'usage de la cryptographie, alors dédiée à des utilisations militaires et gouvernementales. Ce qu'il montre surtout, c'est que l'histoire se répète. Au début de l'usage de la carte à puce, dans les années 1980, il était commun de croire que celle-ci était incassable et digne d'une confiance totale. Cette confiance était si ancrée qu'elle nous offrit un million de dollars sur un plateau.

Lors d'une grande exposition à Bruxelles, vers 1985, un directeur de Philips avait imaginé de distribuer plusieurs dizaines de milliers de cartes à puce, avec comme mission pour les participants de trouver le code d'accès de quatre chiffres, le code PIN. Le premier qui réussirait gagnerait un million de dollars. Or un simple calcul de probabilités montrait que, statistiquement, vu le nombre de cartes distribuées et le nombre de participants,

quelqu'un trouverait forcément le code de sa carte. Cela n'avait rien à voir avec la sécurité. L'un de nous (J.-J. Quisquater) en a fait la remarque au directeur, qui ne l'a pas cru. Avec Louis Guillou, un des pionniers de la sécurisation de la carte à puce, nous avons donc imaginé une attaque afin de montrer que l'on pouvait réellement casser le code de la carte *(voir page 74)*. La boîte de Pandore était ouverte.

Nous n'allons pas raconter ici l'histoire de la carte à puce, qui demanderait bien un livre pour rendre justice à tous et à tous les essais, mais nous allons tenter de montrer comment la carte à puce est devenue à la fois un objet de confiance, grâce à l'introduction de la cryptographie, et la gardienne des clés secrètes, un ingrédient essentiel… de la cryptographie elle-même.

Un objet inviolable par nature, pensait-on

Lors de son apparition, la carte à puce semblait être, de par sa nature même, une enceinte à l'abri des investigations malveillantes et un obstacle à la fraude pour les applications essentiellement monétaires auxquelles on la destinait. Il est vrai que la barrière technologique que constituait un circuit électronique pour le commun des mortels était déjà bien au-delà des compétences nécessaires à la lecture et à la manipulation de la simple bande magnétique des cartes alors en usage. Aussi les premiers développements et brevets n'utilisaient-ils pas vraiment la cryptographie. Que ce soient les Gondas dans *La Nuit des temps* de René Barjavel (1968) – une civilisation disparue qui, pour ses paiements, connectait une clé à un ordinateur central –, les premiers brevets japonais, allemands ou américains, ou encore la « bague » à puce conçue par Roland Moreno en 1974, rien n'indiquait que la puce devait contenir de la cryptographie, bien que des éléments de sécurité fussent évoqués *(voir l'encadré page 74)*.

Tout naturellement, la carte bancaire fut la destination privilégiée de la carte à puce, la simple carte en relief et son « fer à repasser » ou la carte à bande magnétique apparaissant vite, du moins aux banques européennes, comme insuffisamment sûres. Néanmoins, c'est une application imprévue qui fit décoller l'industrialisation de masse de cette technologie : la télécarte, simple réservoir d'unités de communication, qui permit de résoudre la question épineuse des milliers de monnayeurs des cabines téléphoniques. Une autre application de moindre étendue, mais touchant une population influente, contribua aussi à la visibilité de la carte à puce : la télévision à péage. C'est d'ailleurs celle-ci qui, alors que je (J.-L. Desvignes) dirigeais le Service central de la sécurité des systèmes d'information (SCSSI, devenu aujourd'hui l'Agence nationale de la SSI ou ANSSI), me conduisit à me pencher sur la sécurisation de cette technologie et à alerter le gouvernement sur la nécessité de s'en occuper d'urgence.

En 1996, une chaîne de télévision britannique, BSkyB, avait été victime d'un piratage à grande échelle de la part d'une société irlandaise. Celle-ci commercialisait ouvertement de fausses cartes d'accès aux programmes à prix bradé, et les rustines successives imaginées pour contrer ce piratage ne résistaient pas au trésor de guerre rapidement constitué par les pirates. C'est cet exemple de développement d'une industrie mafieuse permis par l'absence d'une prise en compte sérieuse des questions de sécurité au départ du projet que j'utilisai à l'époque afin de convaincre le ministère de la Santé d'adopter une démarche sécuritaire pour ses propres cartes : la carte Vitale et la carte des professionnels de santé. Inutile de décrire les risques qu'aurait comportés la distribution de telles cartes duplicables et falsifiables à souhait.

Les rustines successives imaginées pour contrer ce piratage ne résistaient pas au trésor de guerre rapidement constitué

L'usage public de la carte à puce n'était pas le seul enjeu. Dix ans plus tôt, alors que j'étais « Officier chiffre » à l'état-major des armées, je m'étais occupé de la gestion des clés des équipements de chiffrement, et celle-ci était alors loin d'être satisfaisante. Comme tout responsable de ce domaine à l'époque, j'avais en tête la trahison de Hans-Thilo Schmidt, cet employé du chiffre allemand qui, plusieurs années avant la Seconde Guerre mondiale, avait monnayé auprès du service de renseignement français la fourniture du manuel d'utilisation d'Enigma – la machine à chiffrer allemande dont les décryptements ont été conduits successivement par les Polonais aidés des Français, puis par les Britanniques,

LES AUTEURS




Jean-Jacques QUISQUATER est professeur émérite de cryptologie à l'université catholique de Louvain, en Belgique.

Jean-Louis DESVIGNES, général, est président de l'Association des réservistes du chiffre et de la sécurité de l'information (ARCSI).

notamment le mathématicien Alan Turing – et de ses tableaux de clés, les paramètres de la machine qui permettaient de déchiffrer les messages. Ces renseignements avaient notablement facilité les travaux de cryptanalyse. Or jusqu'aux années 1990, les réseaux de chiffrement gouvernementaux tels que ceux de l'Alliance atlantique avaient peu évolué. Il s'agissait toujours de systèmes à clé secrète – ou systèmes symétriques (la même clé, privée, était utilisée pour chiffrer et déchiffrer) – dont l'initialisation (l'introduction de la même clé dans toutes les machines) était manuelle et permettait donc aux opérateurs d'y avoir accès physiquement.

Quelle que soit la rigueur du processus de sélection de ces opérateurs, il n'était pas exclu de recruter un individu susceptible de compromettre les éléments secrets qu'il manipulait. Certes, des efforts avaient été accomplis pour diminuer cette vulnérabilité en recourant à différentes astuces : des blocs de feuillets détachables journellement évitaient que la compromission des clés s'étale sur une période trop longue. Les techniques de grattage empruntées à certains jeux avaient aussi été envisagées. Sont ensuite apparus des conteneurs de bandes perforées impossibles à rembobiner après lecture (des sortes d'escargot), puis des injecteurs électroniques quelque peu blindés, simples mémoires dotées d'interfaces exotiques impossibles à lire pour un profane, mais d'un coût élevé.

Pour ma part, afin d'augmenter la sécurité des réseaux les plus étendus, j'avais paradoxalement commencé par allonger la cryptopériode de certaines clés pour diminuer le nombre d'exploitants amenés à les manipuler ! En passant de 24 heures à une semaine, je divisais par 5 ou 6 le risque de confier nos plus grands secrets à une brebis égarée.

C'est pourquoi, dès que la carte à puce est apparue, et notamment la carte Bull CP8 au milieu des années 1980, je cherchai à exploiter ses capacités pour initialiser à un coût modeste les nouveaux équipements de chiffrement. Au départ, la carte ne fut donc qu'un réservoir sécurisé de clés secrètes, comme dans le cas de l'équipement de cryptophonie gouvernemental DCS500 de Sagem *(voir la figure ci-contre en bas)*. Il fallut attendre la fin des années 1990 pour que la Défense utilise la carte à puce comme élément contenant les certificats de sécurité dans le cadre d'une « infrastructure de gestion de clés », c'est-à-dire recourant à





© Wikimedia commons/ Papardelle

CES ANCÊTRES DE LA CARTE BANCAIRE ***(en haut, la carte à deux puces de Philips, en bas, la carte CP8 de Bull)*** **portent l'élément clé qui rendit possible la sécurisation de la carte à puce : un processeur.**

LE DCS500 DE SAGEM fut le premier équipement de cryptophonie numérique recourant à une carte à puce pour sa mise à la clé (l'introduction de la clé permettant de chiffrer et déchiffrer les messages). Il a été utilisé par les hautes autorités de l'État et les forces armées à partir des années 1990.

des systèmes cryptologiques asymétriques. Ceux-ci, communément dits à clé publique (ces systèmes ont deux clés, une publique pour le chiffrement, une privée pour le déchiffrement), étaient apparus au milieu des années 1970, mais leur développement à grande échelle n'intervint qu'avec celui d'Internet.

Toutefois, pour que de telles utilisations soient possibles et fiables, encore fallait-il que la carte à puce soit réellement un système sécurisé. Si l'on veut éviter certaines attaques, il faut associer à la puce une certaine puissance de calcul. Prenons le cas simple du mot de passe stocké sur la carte et utilisé pour avoir accès à une ressource, comme c'était le cas au début de la télévision à péage et du Minitel. Supposons une carte, associée à un utilisateur par un code PIN, qui tente de prouver son identité en communiquant ce mot de passe. Pour stocker ce mot de passe, il faut que la puce ait une mémoire inviolable et, par extension, qu'elle soit elle-même inviolable.

La cryptographie, une nécessité

En outre, si le mot de passe est transmis tel quel, en clair, il est facile à copier. Sa transmission ne doit donc pas se faire directement, mais en utilisant un détour, par exemple une question non prévue au sujet de ce mot de passe. En pratique, l'idée est d'utiliser des nombres aléatoires ou le mot de passe en coordination avec un algorithme cryptographique, par exemple une fonction de chiffrement ou un algorithme sans transfert de connaissance (visant à montrer qu'on connaît la solution d'un problème sans la révéler et, inversement, à contrôler la solution d'un problème sans en prendre connaissance).

Or cette idée qu'il fallait introduire une cryptographie forte dans la carte à puce faisait vite son chemin entre 1980 et 1984, notamment chez Bull avec Michel Ugon (inventeur de l'algorithme Telepass), au Centre commun d'études de télévision et télécommunications avec Louis Guillou (inventeur de l'algorithme GOC, générateur d'octets chiffrants) et chez Philips avec l'un de nous (J.-J. Quisquater). J'avais (J.-J. Quisquater) eu la chance, en 1976, de lire l'article *New directions in cryptography* de Whitfield Diffie et Martin Hellman, chercheurs à l'université

Stanford en Californie (qui ont reçu le prix Turing 40 ans après, en 2015, pour leurs travaux), au moment de sa publication. Alors qu'à l'époque, seule la cryptographie à clé secrète – symétrique – était utilisée, les deux cryptologues y proposaient le concept de système à clé publique et montraient l'intérêt de l'arithmétique des grands nombres premiers pour cette approche. Je travaillais alors comme chercheur dans un laboratoire de Philips à Bruxelles dédié aux mathématiques appliquées et, fasciné, je demandai à mon patron la permission de me lancer dans la cryptomathématique. Il accepta et, à sept, nous commençâmes à explorer le domaine, avant même que le premier système à clé publique, l'algorithme de chiffrement RSA, des initiales de ses trois inventeurs, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman, toujours utilisé aujourd'hui, soit publié (il fut annoncé en 1977 par Martin Gardner dans *Scientific American*).

En décembre 1979, Philips France prit contact avec nous pour nous demander de participer à un appel d'offres du groupement d'intérêt économique (GIE) Carte à mémoire, rassemblant alors la Direction générale des télécommunications et des banques françaises, appel d'offres qui visait à tester la viabilité technique et économique de la carte à puce dans la vie réelle. Deux concurrents, Schlumberger et Bull, relevaient le défi, et Philips France voulait aussi tenter sa chance. Or l'équipe en charge du projet avait le sentiment qu'il fallait mettre de la cryptographie dans la carte à puce, au moins pour l'authentification. D'où son appel, puisque nous étions devenus le laboratoire de Philips dédié à la cryptographie. Ainsi, en 1981, le GIE Carte à mémoire lança trois tests grandeur nature de la carte à puce, respectivement à Blois avec Bull, à Caen avec Philips et à Lyon avec Schlumberger, comptant chacun plusieurs centaines de terminaux et plusieurs dizaines de milliers de cartes à puce. Et en préparation de cette expérience, dès début 1980, nous eûmes des réunions pour ajouter des fonctions cryptographiques et des protocoles de sécurité à la carte à puce.

Seule l'expérience de Blois fut jugée convaincante, et la carte à puce de Bull fut développée par la suite. Néanmoins, les cartes à puce étaient encore loin d'une sécurisation correcte, pour une raison simple : si les protocoles de sécurité entraient bien dans la carte, les algorithmes de cryptographie étaient trop

Trouver un code PIN en 1985

Étant donné la carte à puce, il suffisait d'essayer un premier chiffre du code PIN, de déterminer, avec un oscilloscope, la durée du calcul de vérification effectué par la carte et de stopper à temps l'alimentation de la puce afin d'éviter l'enregistrement d'une tentative erronée dans la mémoire de la carte. Vu l'implantation de l'époque, quand le chiffre était juste, le temps de calcul était moins long que quand il était faux. Par essais successifs, on déterminait ainsi le premier chiffre, puis chacun des suivants selon la même méthode.

L'invention de la carte à puce

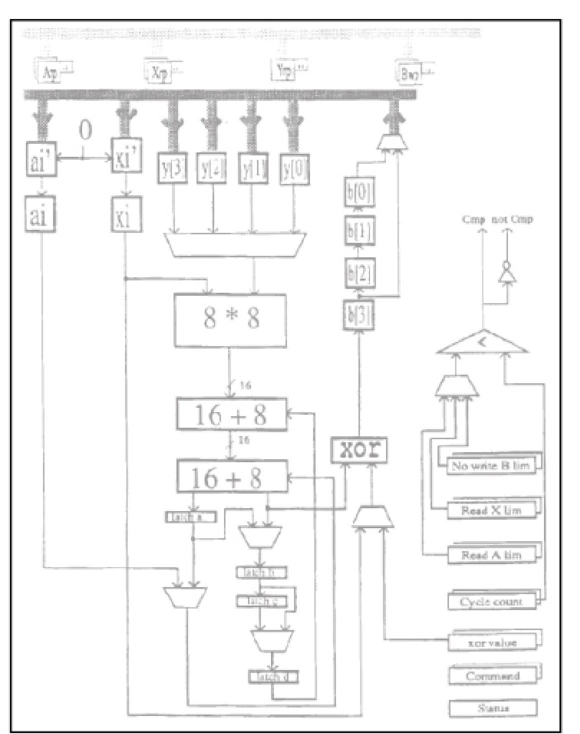
La carte à puce est un morceau de plastique portant au moins un circuit intégré contenant de l'information. On peut donc faire remonter son aventure à 1958, année où Jack Kilby, de Texas Instruments, inventa le premier circuit intégré : il assembla plusieurs transistors sur un support de silicium, ce qui conduisit à la production de processeurs (Intel 4004 en 1969, puis 8008 en 1972) permettant de réaliser de véritables petits ordinateurs miniatures, sur une seule puce.

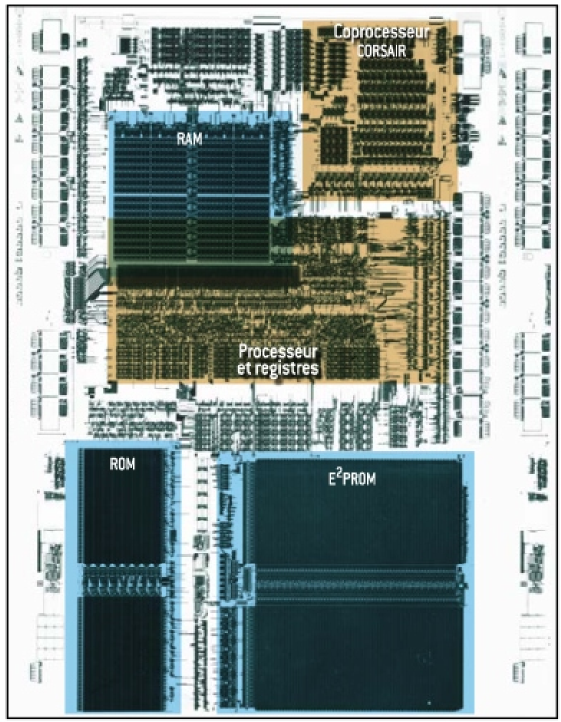
Cette miniaturisation poussa très tôt à imaginer des dispositifs portables pour traiter des paiements. Dès les années 1960, l'auteur de science-fiction René Barjavel décrivait dans son roman *La Nuit des temps* un système de paiement au moyen d'une « bague ». Et entre 1968 et 1972, plusieurs brevets ont été déposés dans ce sens au Japon, en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux États-Unis, décrivant des cartes plastiques munies de mémoires électroniques.

La paternité de la carte à puce à mémoire est souvent attribuée au Français Roland Moreno, qui déposa en 1974 le brevet de la carte à mémoire avec l'aide de Jean Moulin. Mais l'ingénieur français Michel Ugon *(médaillon)*, alors chez Bull, est le véritable père de la carte à puce dite intelligente. C'est lui qui inventa, en 1977, la carte intégrant aussi un microprocesseur, indispensable aux applications exigeant une capacité de calcul à des fins de sécurisation. C'est d'ailleurs Michel Ugon qui, en France, s'impliqua le plus, durant de nombreuses années, dans la sécurisation de l'ensemble de la filière Carte à puce.

En 1977 et 1978, Michel Ugon déposa les deux principaux brevets sur les cartes à microprocesseurs. En mars 1979, il fabriqua la première carte à microprocesseur (à deux puces) et, en octobre 1981, la première carte monopuce à microprocesseur, la carte CP8 de Bull, qui conférait une meilleure sécurité. Les premières commandes industrielles furent lancées, qu'il s'agisse de la télécarte à puce ou de la carte bancaire. Toutefois, la cryptographie n'y était pas d'un très haut niveau, même si on y pensait. À une exception notable près, cependant : dans les années 1970, les travaux chez IBM sous la direction de Carl Meyer furent très tôt orientés vers l'utilisation de la cryptographie, et une version expérimentale de carte, très différente du modèle actuel, fut testée avec l'algorithme cryptographique Lucifer, ancêtre du DES, dans le cadre d'une expérience de transfert de données à Londres. Mais IBM ne poursuivit pas dans cette voie, sa banque sponsor n'ayant pas été convaincue et la technologie des cartes n'étant alors pas assez avancée. La carte à puce intelligente n'en était alors qu'à ses balbutiements...

– J.-J. Q. et J.-L. D.





LA PREMIÈRE PUCE À RSA, CORSAIR *(à droite)*, comportait, outre différentes mémoires (ROM, RAM, E²PROM) et un processeur, un coprocesseur qui facilitait la multiplication de grands nombres – le principe sur lequel est fondé l'algorithme RSA. Le schéma décrit l'algorithme de ce coprocesseur. On y distingue un multiplieur de nombres de 8 bits (octet) et deux additionneurs d'octets. Le reste concerne des sélecteurs, pointeurs et des chaînes de registres qui servent à gérer les paramètres de l'ensemble et les adresses des données à traiter. C'est le plus petit coprocesseur jamais conçu. En un seul coup d'horloge, il réalise l'opération $x \times y + a + b$ où chaque élément est un octet. Cette opération est assez magique, car si on imagine que chaque élément est un chiffre décimal entre 0 et 9, le plus grand nombre pouvant être obtenu est $9 \times 9 + 9 + 9 = 99$, soit un nombre de deux chiffres sans report final vers la gauche. Cette opération seule suffit pour réaliser simplement toute multiplication de grands nombres entiers ainsi que leur division avec reste.

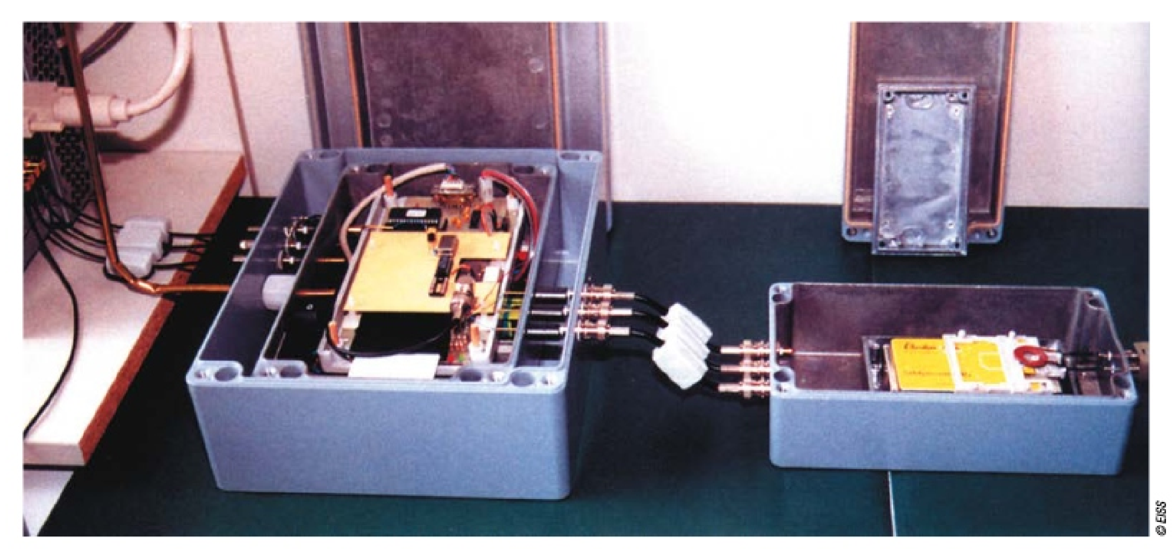
gros par rapport aux capacités des cartes pour y être intégrés, surtout ceux à clé publique. Or les contraintes venant du SCSSI étaient grandes: il fallait éviter le détournement des objets qui utilisaient la cryptographie forte, et la carte à puce ne pouvait donc devenir un réservoir de clés secrètes ou fournir des certificats de sécurité que si elle répondait à ces contraintes. En d'autres termes, ses algorithmes devaient être suffisamment puissants pour empêcher qu'un chiffrement soit facilement associé à un déchiffrement.

La course à l'algorithme

Au début, la carte comportait deux puces, l'une avec le processeur, l'autre avec la mémoire, ce qui offrait *a priori* plus de place pour l'algorithme. Mais on s'était aperçu que la connexion entre les deux, fort visible, permettait d'espionner les échanges processeur-mémoire (en détectant les variations d'intensité du courant consommé, par exemple). La monopuce avait résolu ce problème, mais pas celui de la capacité.

Les premiers algorithmes cryptographiques pour la carte à puce furent donc des algorithmes cryptographiques soit à sens unique, soit inversibles, mais toujours à clé secrète (Telepass 1, TDF, Telepass2, Videopass...). Ces algorithmes étaient bien adaptés à leur contexte restreint en vitesse et en mémoire ainsi qu'aux processeurs 8 bits en usage. Ils utilisaient entre 200 et 300 octets pour leur implémentation complète, ce qui est certainement un exploit. Cependant, l'absence de publication de ces algorithmes en rendait certainement l'usage plus restreint et la diffusion en dehors de la France difficile.

Le vrai départ s'est produit à Eurocrypt 1984, première conférence internationale publique sur la cryptographie, à Paris. Louis Guillou y présenta la carte à puce et l'accès conditionnel. Et lorsqu'on lui demanda pourquoi il n'utilisait pas l'algorithme DES, un algorithme à clés secrètes de 56 bits adopté comme standard en 1976, il répondit: « C'est impossible, car la ROM [mémoire vive] est bien trop petite. » Un défi que je proposai alors à mon équipe de relever. Il y avait en effet au même moment en Belgique un projet de transmission interbancaire sécurisée dénommé TRASEC, dont l'idée était de stocker les clés secrètes des transactions dans une carte à puce sous le contrôle d'un code PIN. Toutefois, l'exécution de l'algorithme DES avec cette clé s'effectuait dans un ordinateur non sécurisé. Intégrer l'algorithme à la carte permettrait d'obtenir


© EISS

AVEC UN DISPOSITIF MODESTE D'ANALYSE DES CARTES À PUCE branché sur un ordinateur, on mesure facilement des temps de calcul ou la consommation électrique, des informations très utiles pour retrouver la clé secrète utilisée dans le cryptosystème RSA des cartes.

cette sécurité manquante. Durant plusieurs mois, nous avons gagné octet par octet, déplaçant les permutations en usage dans le DES et les repliant. Nous avons ainsi réduit l'implantation à un total de 668 octets : chaque octet a coûté environ un jour de travail à une personne…

Le RSA sur une puce

Cependant, pour chacun de nous, le graal cryptographique de la carte à puce n'était pas le DES, mais le RSA. Cet algorithme fondé sur la détermination de deux grands nombres premiers à partir de leur produit était devenu le standard de la cryptographie. L'intégrer à la carte permettrait la signature, la distribution des clés, etc. Paul Barrett, de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, inventa alors, en 1986, un nouvel algorithme pour le RSA, plus spécifiquement dédié à des processeurs pour traitement du signal. Nous sommes donc partis de cet algorithme. Après quelques tests sur une carte à puce, nous sommes arrivés à près de 100 secondes pour exécuter un algorithme RSA à 512 bits. Et à l'aide de quelques astuces (le stockage des multiples du module public et l'utilisation du théorème des restes chinois, qui permet de résoudre des équations d'arithmétique modulaire), nous avons fourni, toujours pour un module RSA de 512 bits, une signature en moins de 20 secondes. Un beau résultat, mais encore trop lent et trop gourmand en ressources pour être utilisé.

En 1989, Henri Molko, de Philips France et Allemagne, nous proposa un projet audacieux : créer un coprocesseur RSA en symbiose avec un processeur 80C51 pour réaliser une signature RSA sur 512 bits en moins d'une seconde (nous ferons 0,2 seconde). Sans moyens financiers, nous nous sommes lancés dans le projet CORSAIR *(Coprocessor RSA In a Rush)*. En cinq semaines, plusieurs versions du coprocesseur ont été imaginées à partir d'un nouvel algorithme que j'avais trouvé peu avant. Cela conduisit à une première accélération du RSA pour carte à puce par un facteur 500. Un premier prototype en silicium fut obtenu début 1990 : tout fonctionna, sauf l'écriture dans la mémoire morte effaçable de la carte (E^2PROM), « trop » optimisée en aval de notre projet *(voir la figure page 75)*.

Un nouvel algorithme, l'algorithme de Quisquater, avait donc été imaginé. Il se différenciait des autres par le fait que le coprocesseur était indépendant de la longueur de la clé et que l'exécution avait lieu à temps constant de bout en bout, car aucun test n'était effectué en cours de calcul, ce qui, *a priori*, évitait les attaques par mesure du temps d'exécution de l'algorithme.

Une course aux coprocesseurs de deuxième génération fut lancée parmi les fabricants : Fortress, Siemens, Infineon… et Philips. En 1995, Philips élabora un nouveau projet pour reprendre le dessus : FAME, qui nous conduisit à une nouvelle version 500 fois plus rapide que celle de CORSAIR. Son secret ? L'amélioration des circuits électroniques, avec l'ajout d'un multiplieur d'horloge qui augmentait de 16 fois sa fréquence, un multiplieur calculant le produit de nombres codés sur 32 bits (au lieu de 8), un bus (la ligne de transmission de l'information) plus large, une mémoire RAM à double accès très vaste et une meilleure chaîne de traitement au sein du coprocesseur. Ce coprocesseur est toujours utilisé dans des variantes optimisées. Au total, en dix ans, une accélération d'un facteur 250 000 a été obtenue entre la première version logicielle en 8 bits et celle de FAME.

Le développement des grandes applications de la carte à puce coïncida avec la volonté de plusieurs pays de définir une méthodologie pour évaluer la sécurité des systèmes informatiques. Les premiers, les Américains proposèrent à l'Otan, à travers l'*Orange Book*, les critères à respecter pour obtenir un niveau de sécurité donné. Ceux-ci apparaissant vite comme une arme de concurrence efficace pour imposer les produits américains, certains pays européens réagirent en proposant chacun un livre de couleur différente : vert pour les Allemands, jaune pour les Britanniques et… bleu-blanc-rouge pour les Français ! Finalement, la Commission européenne s'empara du sujet et ainsi naquirent les ITSEC (critères d'évaluation de la sécurité de la technologie de l'information) qui permirent aux pays européens de mettre en place leur schéma de certification. Notons que les ITSEC différaient de l'*Orange Book* : celui-ci vérifiait la présence de mécanismes

de sécurité, tandis que les ITSEC vérifiaient leur pertinence et leur efficacité.

Bientôt émergea l'idée de critères universels acceptables des deux côtés de l'Atlantique et même au-delà. C'est ainsi que naquirent les « Critères Communs » bientôt transformés en norme ISO, à la rédaction desquels la France prit une part déterminante, la présidence du groupe de travail lui étant revenue.

De fait, alors que les États-Unis et le Royaume-Uni se concentraient sur la certification de différents systèmes d'exploitation et dispositifs de sécurité tels les pare-feu, la France trouva dans la carte à puce un champ d'application privilégié. Son expertise dans ce domaine l'amena même à exercer une sorte de monopole. À ce titre, des firmes prestigieuses coréennes, japonaises et même américaines telle Motorola en vinrent à lui confier les évaluations de leurs produits. Cette grande compétence était le fait d'une petite équipe de chercheurs de France Télécom répartie entre Grenoble et Caen. Une dizaine de personnes qui avaient su, en collaboration avec le SCSSI, développer les méthodes d'investigation à la fois sur le matériel et sur le logiciel et automatiser la recherche de failles. Cette équipe fut ensuite transférée au sein du Laboratoire des technologies de l'information (LETI) du CEA.

Ce travail sur la sécurisation des composants de cartes à puce impliquait un effort considérable de la part des industriels se lançant dans le processus et parfois des changements substantiels dans l'organisation de la chaîne de production à l'intérieur même des salles blanches, pour lesquelles les investissements avaient été considérables. C'est ainsi qu'en 1999 à Tours, lors de l'opération de lancement de Moneo, ce porte-monnaie électronique qui malheureusement n'a pas eu le succès escompté, un PDG de la société, en recevant officiellement son certificat de sécurité, déclara que ce certificat lui avait coûté 20 % de logiciel et de dépenses supplémentaires, un dépassement de 30 % des délais, et 50 % de sueur et de stress en plus pour les premiers composants. Mais il se félicitait du gain en rapidité de développement et de mise au point obtenu ensuite.

Longtemps, la carte à puce ainsi sécurisée fut réputée comme le moyen de paiement le plus sûr, avec une fraude affichée de 0,03 %. Ce taux ne militait pas pour un renforcement de la sécurité. Ainsi la taille des clés, pourtant jugée bien trop faible par les experts, fut maintenue bien trop longtemps. Aussi, quand le GIE Carte bancaire fut confronté à l'affaire Humpich, un vent de panique souffla sur ce bel optimisme.

Sécurisation et législation

Un des problèmes rencontrés pour sécuriser la carte a été la législation française, car les moyens cryptologiques, classés dans la catégorie des armes de guerre, étaient soumis au régime défini par le décret de 1939. Ainsi, lors d'une réunion du Directoire de la cryptologie, vers 1985, le représentant du ministère de l'Industrie, en entrant à Matignon, s'excusa d'avoir pénétré dans ce lieu en portant une arme de deuxième catégorie : sa carte bancaire… Celle-ci contenait en effet un algorithme cryptographique qui interdisait sa possession. Un aménagement au décret fut donc adopté pour ne pas pénaliser cette technologie dont on commençait à percevoir le potentiel… Arme de guerre ou non ? La question refait surface alors que la carte est utilisée pour des moyens de télécommunication ou de diffusion tels que la télévision à péage ou la téléphonie mobile.

L'affaire Humpich

En 1997, Serge Humpich, ingénieur autodidacte de la puce, réussit à casser la signature RSA, alors statique et stockée dans la carte, notamment à l'aide du processus décrit page 74. Il réalisa ensuite des cartes trompant les terminaux de la RATP (les yescards) qui n'exigeaient pas une identification forte, car traitant des transactions d'un faible montant. Il tenta de monnayer son savoir-faire, mais se fit interpeller dans le cadre de la loi Godfrain. Son procès en 2000 suscita quelque effroi, car lui et ses soutiens étaient en mesure de compromettre la clé RSA en la diffusant.

En fait, les fraudes d'origine technologique sont généralement restées d'assez bas niveau, l'essentiel des escroqueries étant à imputer à une incroyable naïveté des victimes et à l'habileté des escrocs en matière d'ingénierie sociale. Pourtant, une vraie vulnérabilité est apparue lorsque les cartes ont été dotées d'une capacité « sans contact ». Il s'est en effet avéré que cette technologie était piratable à courte distance et entraînait le risque d'exfiltration d'informations hautement sensibles. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) s'en est émue et impose désormais aux banques de désactiver cette fonctionnalité sur demande du porteur ou de lui fournir un étui « cage de Faraday » évitant la sollicitation électromagnétique non désirée.

Mais un risque bien plus inquiétant se profile. Avec ou sans contact, la carte à puce est un instrument de sécurité en elle-même. Or on entend beaucoup qu'elle pourrait disparaître en raison des offres nouvelles des géants de l'Internet et de la téléphonie. Que le téléphone utilise une puce SIM ayant de nouvelles capacités ou qu'il remplisse lui-même ces nouvelles fonctions, il n'y aurait alors plus de séparation entre l'outil de communication et le moyen d'identification et d'authentification – la puce. Une situation qui devrait faire le bonheur des pirates… et offrir aux géants du Web Google, Apple, Facebook et Amazon la mainmise sur un des rares domaines pas encore complètement sous la domination américaine. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

Carte à puce et cryptographie : je t'aime moi non plus, conférence de J.-L. Desvignes et J.-J. Quisquater au Musée des arts et métiers du Cnam, 2015 : http://bit.ly/29mT1Lk

S. Bouzefrane et P. Paradinas, **Les Cartes à puce,** Hermès Science Publications, 2013.

C. Tavernier, **Les Cartes à puce. Théorie et mise en œuvre,** 2e édition, Dunod, 2011.

W. Rankl et W. Effing, **Smart Card Handbook,** 4e édition, Wiley, 2010.

M. Éluard et S. Lelievre, **YesCard, entre mythe et réalité ou un aperçu du système bancaire français,** MISC, hors-série n° 002, novembre 2008.

LOGIQUE & CALCUL

Est-il vrai que 0,999... = 1 ?

Les développements décimaux des nombres sont universellement utilisés. Cependant, certains nombres ont deux développements possibles. Il existe des approches qui tentent de l'éviter et de soutenir rigoureusement que 0,999... < 1.

Jean-Paul DELAHAYE

Les notations aident à comprendre et soutiennent la pensée mathématique. De nombreux progrès sont dus à l'introduction de bons symboles et de règles précises qui en fixent la manipulation. Le système de numération décimal de position dû aux mathématiciens indiens des Ve, VIe et VIIe siècles de notre ère permet à tous de représenter des nombres très grands ou très petits et de calculer avec. Ce fut une invention extraordinaire sans laquelle la science n'aurait sans doute pas pu se développer, ni le commerce ou l'industrie moderne.

Il existe cependant des cas où une notation engendre des confusions dont il est difficile de s'échapper. C'est le cas, du moins en première analyse, du problème qui nous intéresse ici. La question est : « Est-il vrai que 0,999... = 1 ? » ou, au contraire, 0,999...< 1 ? »

L'expression 0,999... se réfère bien évidemment à la notation décimale des nombres réels. Les points de suspension signifient ici que la suite de chiffres 9 se poursuit indéfiniment. Cela n'a de sens que moyennant l'idée que n'importe quelle suite de chiffres avec une virgule, par exemple 192,252525..., désigne un nombre bien défini. Nous allons revenir sur le sens précis que l'on attribue aujourd'hui à cette notation. Mais auparavant, sans faire de théorie, et en appliquant quelques règles élémentaires de calcul, énumérons plusieurs des démonstrations que les professeurs de mathématiques proposent aux étudiants afin de les persuader que l'affirmation 0,999... = 1 est vraie.

Démonstration 1. Personne ne doute que 1/3 = 0,333... Imaginons en effet que l'on pose la division de 1 par 3. On trouve 0 ; puis 0,3 ; puis 0,33 ; puis 0,333. On est alors convaincu que cela se poursuit indéfiniment et donc que 1/3 = 0,333...

1	3	10	3	10	3	10	3
	0	1	0,3	10	0,33	10	0,333
				1		10	
						1	

Partant de l'égalité 1/3 = 0,333..., en multipliant de chaque côté du signe égal par 3, on arrive à $3 \times 1/3 = 3 \times 0{,}333...$ ce qui donne 1 = 0,999...

De même, partant de 1/9 = 0,111... obtenu en posant la division, on arrive, en multipliant par 9 de chaque côté du signe égal, encore à 1 = 0,999...

Plusieurs démonstrations

Démonstration 2. Posons u = 0,999... Multiplions de chaque côté par 10 (on remarque que multiplier par 10 un nombre en écriture décimale revient à déplacer la virgule d'une case vers la droite) : $10u$ = 9,999...

Soustrayons maintenant u = 0,999... de chaque côté de l'égalité : $10u - u = 9$ (car bien sûr 9,999... – 0,999... = 9). Cela donne $9u = 9$, donc $u = 1$. On a ainsi à nouveau prouvé que 1 = 0,999...

Démonstration 3. Faisons l'hypothèse que 0,999... < 1. Considérons la moyenne m des deux nombres 0,999... et 1. C'est un nombre inférieur à 1 et supérieur à 0,9, car la moyenne de deux nombres se situe toujours entre les deux nombres considérés. L'écriture décimale de m commence donc par 0,9. Cette moyenne m est aussi supérieure à 0,99 et inférieure à 1 ; c'est donc un nombre dont l'écriture décimale commence par 0,99.

En poursuivant, on établit que le développement décimal de m est nécessairement 0,999... La moyenne m est donc égale au plus petit des deux nombres considérés. C'est absurde, car la moyenne entre deux nombres différents n'est égale à aucun d'eux. L'hypothèse de départ, 0,999... < 1, est donc fausse. Comme il ne se peut pas que 0,999... > 1, on a nécessairement 1 = 0,999...

Il existe une autre fin possible pour ce raisonnement. On pose u = 0,999... Nous avons établi que $m = (u + 1)/2 = u$, donc $u + 1 = 2u$, ce qui donne $u = 1$.

Toutefois, les enseignants de mathématiques le savent bien : même après l'exposé de telles démonstrations, si on interroge les étudiants en leur laissant vraiment la parole, ils exprimeront encore des doutes sur la validité de l'égalité. De nombreuses études réalisées en divers endroits du monde confirment que même après une ou plusieurs démonstrations en bonne et due forme, tout le monde n'est pas convaincu de l'égalité.

Des dizaines d'articles de didactique des mathématiques ont porté sur cette étrangeté. Il me semble qu'elle a une

L'abandon des infinitésimaux

Bien que l'on ait utilisé les infinitésimaux dès l'Antiquité, ce sont les travaux de Leibniz qui ont permis leur emploi généralisé et le développement du calcul infinitésimal aux XVIIe et XVIIIe siècles. Le grand mathématicien Leonhard Euler les manipulait avec expertise dans son ouvrage fondamental *Introductio in analysin infinitorum*.

Cependant, certaines difficultés à calculer rigoureusement avec les infinitésimaux ont conduit le mathématicien Michel Rolle et l'évêque George Berkeley *(voir la bibliographie)* à contester leur usage jugé trop incertain et finalement très délicat. Au XIXe siècle, les travaux de Cauchy et de Weierstrass, entre autres, ont permis de les abandonner au profit d'une conception nouvelle qui se fonde sur la définition suivante de limite d'une suite numérique et sur des définitions du même type pour la continuité des fonctions.

Par définition, la suite numérique (x_n) converge vers la limite L si pour tout ϵ (epsilon) donné strictement positif (par exemple de la forme $1/m$), il existe un entier k, tel que pour tout entier $n > k$, on a $|x_n - L| < \epsilon$.

Moyennant ces définitions et l'utilisation de la théorie des ensembles, due à Cantor, pour construire les nombres réels à partir des entiers, on tire une conception de ces nombres universellement adoptée aujourd'hui. C'est le « continu ensembliste ». Il permet de résoudre la question de la comparaison entre 1 et 0,999... : $0{,}999... = \lim_{n\to\infty} 0{,}99...9$ (n fois le 9) $= \lim_{n\to\infty} (1 - 1/10^n)$ $= 1 - \lim_{n\to\infty} 1/10^n = 1$.

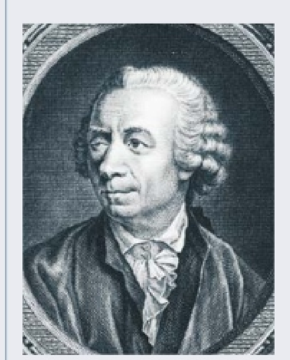
L'idée d'infinitésimal n'a jamais été totalement abandonnée, y compris par Cauchy qui l'utilise pour formuler la notion de continuité avant d'en venir à la définition avec des ϵ. Le mathématicien Mikhail Katz *(voir la bibliographie)* dénonce la réécriture simplifiée de l'histoire des mathématiques qui oublie le rôle constant des infinitésimaux dont l'utilisation n'a jamais vraiment cessé d'être féconde.

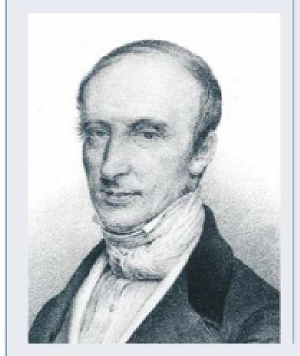
Abraham Robinson, dans la décennie 1960-1970, en a proposé une version moderne conforme aux canons de la rigueur mathématique contemporaine. L'analyse aujourd'hui peut donc soit se passer des infinitésimaux (ce qu'on fait dans l'enseignement le plus souvent), soit les utiliser en se fondant sur la conception de Robinson, dont il existe d'ailleurs à présent plusieurs présentations, certaines suffisamment simples pour l'enseignement.

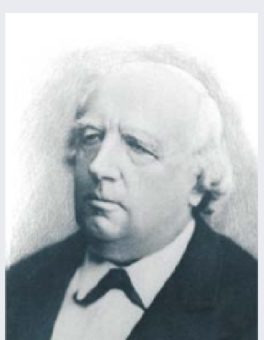

G. W. Leibniz (1646-1716)

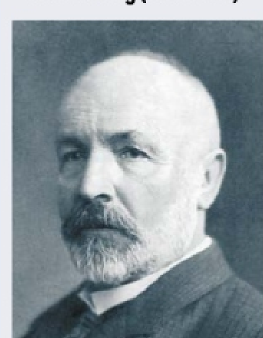

M. Rolle (1652-1719)

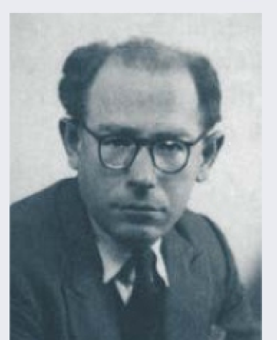

G. Berkeley (1685-1753)


L. Euler (1707-1783)


A. L. Cauchy (1789-1857)


K. Weierstrass (1815-1897)


G. Cantor (1845-1918)


A. Robinson (1918-1974)

explication simple. Les étudiants ne sont pas convaincus par les démonstrations du type de celles proposées plus haut parce que dans le monde des entiers et des nombres décimaux finis qu'ils manipulent depuis l'âge de 6 ou 8 ans, la règle suivante produit toujours un bon résultat.

Règle de comparaison. Pour comparer deux nombres positifs, on les place l'un sous l'autre en alignant les virgules, puis on regarde le premier chiffre différent rencontré en les parcourant simultanément de gauche à droite. Dès que deux chiffres différents sont rencontrés, on est certain que les deux nombres comparés sont différents et le plus petit des deux chiffres différents désigne le plus petit des deux nombres comparés.

Par exemple, si l'on doit comparer 0,28145 et 0,2813989, on écrit :
0,28145
0,2813989.
La règle indique que le premier nombre est le plus grand, car 4 est supérieur à 3. En appliquant la règle avec 1 (qu'on écrit aussi 1,000...) et 0,999..., on obtient que 1,000... est plus grand que 0,999..., car le premier chiffre du premier nombre est 1, et le premier chiffre du second est 0 :
1,000...
0,999...

D'après la règle de comparaison, pas de doute : 0,999... < 1. La réponse d'un professeur à un étudiant récalcitrant qui lui exposerait cet argument sera, sous une forme ou une autre : « Ce qui est vrai avec les développements décimaux finis ne l'est pas nécessairement avec les développements décimaux infinis. La règle de comparaison des nombres entiers ou décimaux, valable s'ils sont finis, ne s'étend pas aux nombres réels écrits avec des développements décimaux infinis. » En langage simple : tout ne passe pas à l'infini.

L'autorité du professeur permet de clore le débat. Pourtant, l'étudiant récalcitrant pourrait à juste titre répliquer : « Mais ce passage à l'infini avec la règle de comparaison n'est pas moins légitime que ceux utilisés dans les démonstrations 1, 2 et 3 fondées aussi sur des extensions à l'infini des règles connues pour les développements décimaux finis. » Nous sommes alors revenus au point de départ. Qui a raison ? Le professeur avec ses trois démonstrations ou bien l'étudiant récalcitrant avec sa règle de comparaison qui contredit la thèse d'égalité du professeur ?

Pour prolonger le débat sans utiliser d'argument d'autorité, il faut revenir à la notion des développements décimaux illimités.

La conception admise universellement aujourd'hui se fonde sur l'idée de « suite convergente ». Écrire un nombre r sous la forme $0,a_1a_2a_3...a_n...$ revient à dire que r est égal à
$a_1/10 + a_2/100 + a_3/1\,000 + ... + a_n/10^n + ...$, c'est-à-dire que r est la limite de la suite numérique : $a_1/10$, $a_1/10 + a_2/100$, $a_1/10 + a_2/100 + a_3/1\,000$, ...

Epsilon à la rescousse

Le nombre r est ainsi la limite d'une suite dont chaque élément a un développement décimal fini. Par exemple, 0,333... désigne la limite de la suite 0, 3/10, 33/100, 333/1 000, etc. Cette conception a été rendue entièrement précise grâce aux notions de limite élaborées par Bernard Bolzano, Augustin Louis Cauchy et Karl Weierstrass au début du XIXe siècle. C'est ce qu'on nomme parfois la définition des limites à la ϵ (epsilon) et δ (delta). En complétant celle-ci par les méthodes de construction de l'ensemble des nombres réels à partir des entiers (au moyen des « suites de Cauchy » ou des « coupures de Dedekind »), les mathématiciens se sont accordés sur une idée parfaitement précise des nombres réels et de ce que désignent les développements décimaux illimités.

Ces fondements rigoureux élaborés au XIXe siècle nous rassurent, ainsi que l'accord unanime qui règne à leur sujet. C'est cette conception qui a été enseignée, et elle est devenue naturelle à tous. Nous la dénommerons la « conception classique des nombres réels et du continu ». Que nous dit cette conception de la question « 1 = 0,999... ? » ? Sans surprise, elle confirme le camp des professeurs.

Démonstration 4. Le nombre $u = 0,999...$ est la limite, quand n tend vers l'infini, de la suite dont le terme général est :
$x_n = 0,9 + 0,09 + ... + 0,0...09$ (avec n zéros entre la virgule et le dernier 9). Après factorisation : $x_n = 0,9\,(1 + 1/10 + ... + 1/10^n)$.

Sachant que $0,9 = 1 - 1/10$, appliquons à ce résultat l'identité :
$(1 - a)(1 + a + a^2 + a^3 + ... + a^n) = 1 - a^{n+1}$, que l'on peut vérifier en développant. On en déduit $x_n = 1 - 1/10^{n+1}$. La suite 10^{n+1} tend vers l'infini quand n tend vers l'infini, donc $1/10^{n+1}$ tend vers 0, et x_n tend vers 1, d'où 1 = 0,999...

Dans les autres bases de numération

Dans toutes les bases de numération, on rencontre une difficulté analogue à celle créée par les développements décimaux se terminant par une infinité de 9. Dans la base 2, la conception classique des nombres réels conduit à l'égalité 1 = 0,111... ; dans la base 3, on a 1 = 0,222... ; etc.

Il faut noter cependant que la non-unicité des développements décimaux (ou binaires, etc.) ne concerne qu'une faible partie des nombres réels.

Les nombres ayant deux développements décimaux sont en effet ceux de la forme $k/10^p$ où k et p sont des nombres entiers. Il n'y a donc qu'une infinité dénombrable de nombres réels ayant deux développements décimaux différents. Comme l'infini des nombres réels est non dénombrable (autrement dit, strictement plus grand que l'infini dénombrable), on peut dire que les nombres ayant deux développements décimaux différents sont en quantité négligeable par rapport aux autres nombres. L'unicité des développements décimaux est donc « presque toujours » vraie !

Remarquons aussi qu'il existe une façon d'avoir l'unicité des développements décimaux : il suffit d'interdire ceux se terminant par une infinité de 9.

Quelle théorie des infinitésimaux ?

Quand Leibniz invente le calcul infinitésimal en même temps que Newton, il utilise des infinitésimaux, c'est-à-dire des quantités plus petites que tout inverse de nombre entier. On les note parfois *dx*. Une propriété de ces nombres infiniment petits est que, même en en prenant beaucoup, on ne réussit jamais à atteindre la valeur 1 : $dx < 1$; $2dx < 1$; $3dx < 1$, etc. On dit que l'ensemble des nombres auxquels on ajoute les infinitésimaux est non archimédien.

La manipulation des infinitésimaux est délicate et conduit facilement à des incohérences que George Berkeley dénonça. S'en passer pour définir la continuité ou la notion de dérivée sera donc considéré comme un progrès au XIXe siècle. Pourtant, en 1966, Abraham Robinson propose une théorie qui permet de parler sans risque des nombres infiniment petits.

Depuis, d'autres méthodes ont été proposées pour manipuler des infinitésimaux. Il y a la théorie des *smooth infinitesimals* de John Bell, celle d'Alain Connes où l'on perd la commutativité. Les nombres surréels de John Conway donnent aussi une version incontestablement rigoureuse de ces infinitésimaux, qui ont donc trouvé une place dans les mathématiques.

Cependant, aucune de ces théories ne propose des nombres réels aussi simples que la théorie classique qui refuse les infinitésimaux. On peut dire des infinitésimaux que, une fois ceux-ci maîtrisés, certaines démonstrations s'en trouvent simplifiées, mais que les maîtriser n'est pas simple. Ajouté au fait qu'on a au moins quatre façons assez différentes de les introduire, tout cela rend difficile une réhabilitation concrète des infinitésimaux et leur utilisation dans l'enseignement (bien que cela ait été tenté). Aucune de ces théories ne conduit d'ailleurs à donner un sens clair à l'inégalité stricte 0,999... < 1. Dans certaines, elle est partiellement vraie, dans d'autres elle n'a pas de sens.

Quoi qu'on fasse, il ne semble pas possible de concevoir un continu donnant définitivement raison à ceux qui refusent d'admettre que 0,999... = 1.

Sur les théories concurrentes des infinitésimaux, on pourra consulter Mikhail G. Katz et Éric Leichtnam, « Commuting and noncommuting infinitesimals », *American Mathematical Monthly*, vol. 120(7), pp. 631-641, 2013.

Nous n'avons pas détaillé toutes les étapes (avec des epsilons) qui justifient les affirmations successives, mais c'est assez facile pour qui a saisi l'esprit de la conception classique des nombres réels.

La notion classique de nombre réel, par le biais des limites, confirme donc que les démonstrations 1, 2 et 3 sont justes. Elle permettrait d'ailleurs de justifier les règles infinies à l'œuvre dans ces démonstrations, tout en ne permettant pas de valider la règle de comparaison utilisée par l'étudiant récalcitrant car les inégalités strictes ne passent pas à la limite pour les suites.

Avec des lycéens, il ne faut pas aller plus loin dans la discussion. On profitera au contraire de l'occasion pour énumérer toutes les conséquences de cette conception des réels fondée sur les limites. Les voici.

– Certains passages à la limite sont illégitimes : même si, pour tout entier n, $y_n < a$ et que la suite y_n est convergente, cela n'implique pas que $\lim_{n\to\infty} y_n < a$, mais seulement que $\lim_{n\to\infty} y_n \leqslant a$.

– Certains nombres réels, ceux de la forme $n/10^k$ (n et k entiers), ont deux développements décimaux : l'un se termine par une infinité de 0 (que l'on n'écrit pas), l'autre par une infinité de 9. Ainsi : 0,15 = 0,14999... ; 12,8 = 12,7999... ; 1 = 0,999...

– La situation est analogue dans toutes les bases de numération. En base 2, par exemple, 1,000... = 0,111... ; 0,101 = 0,100111...

– La difficulté à admettre que 1 = 0,999... provient de la confusion entre « notation décimale infinie » et « nombre réel ». Dans le monde des nombres entiers et décimaux finis, l'identification des nombres et de leur écriture décimale est sans conséquence du fait de l'unicité de l'écriture décimale. En passant aux développements infinis, elle devient impossible et oblige à une conception plus abstraite des nombres réels. Il ne faut pas assimiler les nombres réels et leur représentation décimale. Le monde aurait été plus simple si chaque nombre réel avait un unique développement décimal infini, mais ce n'est pas le cas !

Reste une question : est-il totalement inconcevable de définir une situation mathématique qui donne un sens à 0,999... < 1 ? La réponse est qu'il est possible de trouver des formalismes donnant raison à l'affirmation 0,999... < 1. Attention cependant aux conséquences ! On va envisager deux voies permettant de préserver l'idée intuitive initiale d'une inégalité stricte entre 0,999... et 1. On verra qu'aucune ne conduit à un ensemble de nombres vraiment en mesure de concurrencer les nombres réels tels que le XIXe siècle les a définis. Pour simplifier, nous n'envisagerons que des nombres positifs, mais bien sûr, moyennant quelques ajustements, tout ce que nous disons s'adapte aux nombres négatifs.

Les nombres réels de l'étudiant récalcitrant

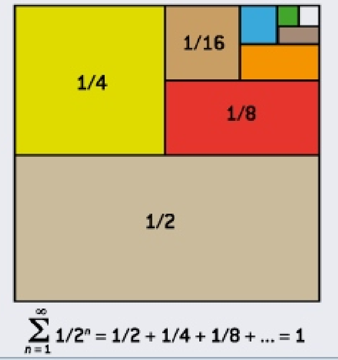
La première méthode est simple et brutale : on dédouble les nombres décimaux finis. C'est une méthode économique : on ne change presque rien, on se contente de prendre au sérieux que 0,999... < 1 et toutes les inégalités du même genre. Nous dénommerons cette attitude « les nombres réels de l'étudiant récalcitrant ».

Une démonstration graphique

Une tentative pour démontrer que 0,999... = 1 s'appuie sur un dessin. On se place en base 2, où le problème est alors transformé en la question : 0,111... est-il égal à 1 ?

Le développement 0,111... désigne en fait la somme $1/2 + 1/4 + 1/8 + ... + 1/2^n + ...$ Or le dessin ci-contre, où le grand carré de côté 1 est convenablement décomposé, montre que cette somme vaut bien 1.

Notons cependant que le sceptique, là encore, pourrait se montrer insatisfait. En effet, il n'est pas vrai que la réunion de tous les carrés et rectangles internes recouvre le coin en haut à droite du grand carré de côté 1. Ce point reste indéfiniment non recouvert !



$$\sum_{n=1}^{\infty} 1/2^n = 1/2 + 1/4 + 1/8 + ... = 1$$

On considère donc que toute suite de chiffres décimaux avec une virgule (par exemple 315,212121...) est un nombre réel et que deux tels nombres sont égaux si et seulement s'ils ont les mêmes chiffres. L'ordre qui permet de les classer est celui défini par la règle que l'étudiant évoquait : on place l'un sous l'autre les deux nombres à comparer en alignant les virgules et on les parcourt en parallèle de gauche à droite jusqu'à trouver une différence qui indique alors le plus petit. Cet ordre est dénommé ordre lexicographique sur les suites infinies (à droite) de chiffres avec virgules. Par exemple, 7 345,222222... est plus grand que 7 345,221222...

Avec ces nombres réels de l'étudiant récalcitrant, on a 0,999... < 1.

L'ordre défini entre les nombres réels classiques est tel qu'entre deux nombres différents on trouve toujours une infinité d'autres nombres réels. Pour les nombres réels de l'étudiant récalcitrant, c'est vrai aussi... sauf dans le cas où les deux nombres sont ceux qui étaient auparavant confondus, comme 1 et 0,999.... Pour l'ordre de l'étudiant récalcitrant, il n'y a, par exemple, aucun autre nombre entre 2,19999... et 2,20000... Ils sont différents et il y a comme un trou entre eux. En fait, il y a une infinité de tels trous : il y en a un derrière chaque nombre se terminant par une infinité de 9. Cela contredit l'idée que nous avons du continu, censé représenter la structure de la droite géométrique, lisse et infinie. De ce point de vue déjà, les réels de l'étudiant récalcitrant ne sont pas très satisfaisants. Et ils rencontrent d'autres difficultés avec les opérations.

Pour définir les opérations entre les nombres réels de l'étudiant récalcitrant, plusieurs méthodes sont envisageables. Choisissons-en une et voyons ses défauts (les autres méthodes ne sont pas meilleures).

On convient que le résultat de l'addition de r et de r' (respectivement de la multiplication de r et de r') est le nombre $f(r + r')$ [respectivement $f(r \times r')$] où + et × sont les opérations définies par les règles de calcul usuelles avec retenues et où f est l'opération qui transforme, si c'est nécessaire, une série infinie de 9 en 0 et qui simultanément ajoute 1 au chiffre juste avant la série des 9.

Pour l'étudiant récalcitrant, l'opération 0,666... + 0,333..., par application des règles de calcul usuelles, donne d'abord 0,999..., puis, par application de f, donne 1. Pour lui, on a donc : 0,666... + 0,333... = 1. Si on avait choisi d'avoir 0,666... + 0,333... = 0,999... (plus naturel au premier abord), on aurait eu 1/3 + 2/3 = 0,333... + 0,666... = 0,999..., alors qu'on s'attend à trouver 1/3 + 2/3 = 1. Cela n'aurait pas été plus satisfaisant !

La méthode proposée évite, quand on calcule, de tomber sur des 999..., donc sur le problème mentionné avec 1/3 + 2/3 et bien d'autres du même type. Surtout, les opérations adoptées conduisent à démontrer sans mal que l'addition est commutative et associative, ainsi que la multiplication. Il y a aussi distributivité de l'addition par rapport à la multiplication. Les nombres réels de l'étudiant récalcitrant ont, à première vue, un comportement assez raisonnable.

Ce n'est pas vrai en tout point, car 1 n'est plus l'élément neutre de la multiplication : multiplier par 1 change parfois un nombre. On a en effet 0,999... × 1 = 1

Pire, la règle de simplification par un nombre non nul (si $a \neq 0$, alors de $a\,b = a\,c$ on déduit $b = c$) n'est plus vraie : de 0,999... × 1 = 1 = 1 × 1 on ne peut pas déduire 0,999... = 1, puisque justement, pour l'étudiant récalcitrant, 0,999... est différent de 1.

Pour utiliser ces nombres, il faudrait revoir toutes les règles de calcul et de manipulation algébrique qu'on a l'habitude d'utiliser.

La notion de limite dans le monde des nombres réels de l'étudiant récalcitrant n'est pas non plus très satisfaisante : la suite $1 - (1/10)^n$ ne converge pas vers 1, mais vers 0,999... (qui n'est pas 1 !). Pourtant, $1/10^n$ converge vers 0, ce qui implique que $1/10^n - 1$ converge vers -1. En d'autres termes, l'opposé d'une suite qui converge vers L n'a pas nécessairement comme limite $-L$. Désagréable ! L'étudiant récalcitrant disposera peut-être de nombres réels qui vérifient l'inégalité 0,999... < 1, mais à quel prix ! Cherchons autre chose.

La voie de l'analyse non standard

La notion de limite définie au XIX[e] siècle et qui fonde la conception contemporaine du continu interdit de considérer les infinitésimaux, c'est-à-dire les nombres plus petits que n'importe quel inverse d'un entier non nul. Ces nombres infiniment petits n'existent pas dans la conception classique des réels. Pourtant, les mathématiciens des XVII[e] et XVIII[e] siècles, Leibniz en particulier, les utilisaient. Les physiciens aujourd'hui encore aiment en faire usage, car ils simplifient certains calculs. Or en 1966, le mathématicien américain Abraham Robinson a montré que l'on peut envisager sans incohérence des nombres réels qui contiendraient des infinitésimaux. Sa théorie,

l'analyse non standard, est élégante et puissante ; elle a mis fin au discrédit dont étaient victimes les infinitésimaux. La théorie est fondée sur celle des modèles, un domaine de la logique mathématique développée au XXe siècle. Elle constitue une conception alternative à la notion classique des réels.

Dans cette théorie, on construit une notion de développement décimal analogue à celle, classique, fondée sur les suites convergentes. On donne alors un sens à 0,999... Cette fois, cependant, les points de suspension désignent une infinité de 9, infinité qui peut prendre plusieurs sens car il y a maintenant plusieurs sortes de nombres entiers infinis *H* (qui n'existent pas dans la théorie classique) et il y a en beaucoup. Selon que le nombre infini de 9 représenté par les points de suspension de 0,999... est plus ou moins grand, on obtient soit un nombre réel qui est égal à 1, soit un nombre strictement inférieur à 1. Cela provient de ce que si on place *H* chiffres 9 dans 0,999..., alors on a $0{,}999... = 1 - 1/10^H$, qui n'est pas 1 (à un infinitésimal près).

La théorie de ces développements décimaux a été faite par le mathématicien Albert Lightstone. L'étudiant récalcitrant qui renoncera sagement à sa première tentative pourrait se replier sur cette analyse non standard et soutenir que 0,999... < 1 n'est pas absurde. Puisque les nombres réels de l'analyse non standard de Robinson constituent un corps (un ensemble où l'addition et la multiplication sont bien définies), on ne rencontrera pas avec eux les difficultés constatées avec la méthode trop naïve du dédoublement des décimaux finis.

0,999... est bien égal à 1 !

Que faut-il penser de cette analyse non standard ? Doit-on adopter ses nombres réels (parfois dénommés hyperréels) plutôt que ceux, classiques, légués par le XIXe siècle et adoptés universellement ? La question est délicate. Disons simplement que de nombreux travaux continuent de défendre cette conception dont les partisans affirment qu'elle produit souvent, pour un même résultat, des démonstrations plus directes et simples que la conception classique. Certains soutiennent même qu'elle est utilisable dans le cadre d'un enseignement général de l'analyse.

Les opposants ou les sceptiques ne remettent pas en cause la cohérence de la théorie dont il a été prouvé qu'elle était aussi vraisemblable que celle des nombres réels classiques, mais ils doutent de sa simplicité. Le commentaire suivant provient d'un mathématicien assez représentatif qui, dans une discussion à propos de la rédaction d'un article de Wikipédia, écrivait :

« Je suis d'accord que l'analyse non standard est un domaine intéressant, qui explique certainement pourquoi les arguments informels utilisant les infinitésimaux produisent souvent les mêmes réponses que la méthode rigoureuse à la epsilon-delta des limites. Cependant, j'ai des doutes concernant l'affirmation que les preuves du calcul non standard sont plus simples ou plus claires que les preuves standard. Elles ne sont plus simples que si vous vous placez au cœur de l'analyse non standard, et il faut pour cela un haut niveau de maturité mathématique. Bien sûr, l'enseignant peut aider artificiellement les étudiants en leur disant : "Faites-moi confiance, nous pourrions faire tout cela rigoureusement si nous le voulions" ; mais alors c'est qu'il est en train en réalité de proposer un argument informel, et non pas une démonstration rigoureuse. »

Malgré cinquante ans d'existence, l'analyse non standard n'a pas pu s'imposer comme une conception alternative à l'analyse classique. Il est peu probable que cela se produise maintenant, d'autant qu'elle existe sous plusieurs formes concurrentes. Pas plus que d'autres tentatives, elle n'offre un moyen simple permettant de soutenir que l'on a définitivement 0,999... < 1. On doit donc conclure qu'il faut accepter que 0,999... = 1. Il est raisonnable aussi de considérer que l'intuition d'une inégalité stricte entre 0,999... et 1 n'est qu'un effet de confusion dû à une notation, laquelle nous piège en nous faisant imaginer une identité qui n'existe pas entre nombres réels et suites de chiffres décimaux avec virgule. Les notations sont des aides merveilleuses pour comprendre les mathématiques et les faire progresser ; parfois, cependant, elles nous embrouillent ! ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

P. Błaszczyk *et al.*, **Ten misconceptions from the history of analysis and their debunking,** *Foundations of Science*, vol. 18(1), pp. 43-74, 2013.

K. Katz, M. Katz, **Zooming in on infinitesimal 1–. 9... in a post-triumvirate era,** *Educational Studies in Mathematics*, vol. 74(3), pp. 259-273, 2010.

M. Blay, **Deux moments de la critique du calcul infinitésimal : Michel Rolle et George Berkeley,** *Revue d'histoire des sciences*, vol. 39(3), pp. 223-253, 1986 (http://bit.ly/28M69c1).

Discussions du problème 0,999...=1 : www.quora.com/Is-0-999-dots-1-in-the-hyperreals www.cut-the-knot.org/WhatIs/Infinity/9999.shtml#MK

Wikipedia, **Criticism of nonstandard analysis,** https://en.wikipedia.org/wiki/Criticism_of_non-standard_analysis

M. Katz, **When is .999... less than 1 ?,** http://u.cs.biu.ac.il/~katzmik/999.html



SCIENCE & FICTION

Seul sur Mars, un manuel de survie

Dans ce film qui raconte l'histoire d'un naufragé de l'espace, la science a un rôle prépondérant. Tempête de sable dévastatrice, culture de pommes de terre... : ces scènes sont-elles plausibles ?

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER **Illustration : Marc BOULAY**

Elle est rouge. Elle est froide. Elle est désertique. Et pourtant, aucune autre planète n'a autant excité l'imagination, n'a été l'objet d'autant de rêves ou la cible d'autant de missions scientifiques. À l'heure où les émissaires robotisés de la planète Terre continuent à envahir Mars, le film *Seul sur Mars* (Ridley Scott, 2015), tiré du livre *The Martian* (Andy Weir, 2011) montre comment l'astronaute Mark Watney va survivre seul à la surface de la planète rouge grâce à ses connaissances scientifiques. L'histoire, bien documentée, repose sur des techniques aérospatiales actuelles. Et pourtant, on ne peut s'empêcher de se demander si tout cela est bien réaliste.

Commençons par examiner le vaisseau *Hermès* qui conduit les astronautes sur la planète Mars. Sa grande roue, façon *2001, l'Odyssée de l'espace,* reproduit une gravité artificielle, mais semble un peu excessive. On ne peut nier l'intérêt de recréer une pesanteur durant le voyage de six mois jusqu'à Mars, mais le dispositif utilisé sera sans doute plus léger et moins coûteux que celui du film. En revanche, le programme et le déroulé de la mission *Arès III* du film sont assez raisonnables. Ils ressemblent à ceux retenus par la Nasa, directement fondés sur les travaux de l'expert en exploration martienne Robert Zubrin : un vaisseau principal pour atteindre Mars, un habitat sous pression où séjourner sur place et un MAV *(Mars Ascent Vehicle)* pour quitter le sol et revenir au vaisseau principal, en orbite autour de la planète, le tout envoyé avant l'arrivée des astronautes. Le MAV est un élément clé : trop massif pour être expédié sur Mars avec un réservoir plein, il est déposé à l'avance avec juste une petite réserve d'hydrogène. Il fabrique son carburant sur place à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne grâce à une usine chimique alimentée par un moteur nucléaire.



© 20th Century Fox

DANS *SEUL SUR MARS*, Mark Watney doit faire preuve d'ingéniosité pour survivre grâce à ses connaissances en chimie, en botanique, en électronique, etc.

Dans le film, le programme ne se déroule pas comme prévu. L'histoire commence quand les astronautes doivent faire décoller le MAV en pleine tempête martienne, avant que ce module ne bascule sous l'effet du vent. Devant l'urgence de la situation, ils sont contraints d'abandonner l'un des leurs, victime d'un accident. Le sol martien est régulièrement balayé par des tempêtes – les particules soulevées donnent d'ailleurs au ciel sa couleur orange (et bleue au coucher du Soleil). Mais la tempête du film peut-elle faire autant de dégâts ?

Avec une pression atmosphérique martienne très faible, 160 fois inférieure à celle de la Terre au niveau de la mer et une température moyenne de –60 °C, la densité atmosphérique de Mars est 60 fois inférieure à celle de la Terre. Or la pression exercée sur un obstacle par un fluide en mouvement est proportionnelle au produit de la densité du fluide par le carré de sa vitesse. Dès lors, si la pression exercée par un vent de vitesse donnée est 60 fois plus faible sur Mars que son équivalent terrestre, une tempête ne serait ressentie que comme une brise par les astronautes.



© 2016 Marc Boulay, marcboulay.fr, cossima-productions.com

AU COUCHER DU SOLEIL SUR MARS, le ciel de la planète se pare d'une couleur bleue. En effet, la taille des grains de poussière présents dans l'atmosphère martienne est telle que celle-ci laisse passer surtout la lumière bleue.

Estimons quelle vitesse de vent serait nécessaire pour faire basculer la navette. Pour ce faire, il faut tenir compte de la gravité martienne, 2,6 fois plus faible que celle de la Terre. Le rapport entre la force exercée par le vent et le poids du véhicule est donc, à vitesse de vent égale, environ 23 (la valeur de 60/2,6) fois plus faible sur Mars que sur la Terre. La pression exercée par le vent étant proportionnelle au carré de sa vitesse, celle-ci devrait être, sur Mars, environ 4,8 fois supérieure ($\sqrt{23} \approx 4{,}82$) à celle qui, sur Terre, ferait basculer le MAV. Il faudrait donc des vitesses bien plus élevées que celles des vents les plus violents enregistrés sur la planète rouge, de l'ordre de 30 mètres par seconde. Comme souvent, le cinéma a ses exigences que la nature ne partage pas.

Ainsi, le vent martien ne pourrait soulever qu'une fine poussière, composée de grains mesurant quelque 50 à 100 micromètres. Les particules transportées sont plutôt de fines argiles. Or, dans le film, on voit passer des aiguilles de silice et des graviers lors de la tempête initiale !

Pour survivre, Watney cultive des pommes de terre dans un sol martien enrichi de ses excréments, mais il a besoin d'eau. Et pour faire de l'eau, il suffit de faire brûler du dihydrogène dans le dioxygène de l'air et de condenser la vapeur d'eau ainsi produite. Il faut aussi être prudent, car la réaction est très exothermique. Le problème est de disposer de dihydrogène, absent de l'air martien.

Dans le film, Watney utilise de l'hydrazine, carburant utilisé dans les moteurs à faible poussée qui assurent le positionnement sur orbite des satellites et des sondes spatiales. Dans ce cas, l'hydrazine est employée seule. En présence d'un catalyseur, elle se décompose en diazote et dihydrogène. Cette réaction exothermique se produit en quelques millisecondes, ce qui permet de doser précisément la poussée de la sonde. Sur Mars, Watney utilise cette réaction pour produire l'hydrogène dont la combustion avec l'oxygène de son habitat lui permet d'obtenir de l'eau.

Récolte de patates martiennes

Mars n'est pas dénuée d'eau : elle existe sous forme de glace (que Watney pourrait fondre avec son réacteur nucléaire). Se trouvant dans une région proche de l'équateur, le héros aurait dû se déplacer à des latitudes plus élevées, au-delà de 25 degrés, pour en trouver sous quelques centimètres de sable martien, sur des pentes orientées vers les pôles. Mais même avec de l'eau pour arroser ses plants, une alimentation à base de pommes de terre uniquement conduirait, à terme, à d'importantes carences.

Même s'il a des défauts, ce film permet au moins de poser la question des vols habités vers Mars. Explorer Mars pour tenter de savoir si un processus d'évolution prébiotique, voire l'émergence de la vie, a pu s'y dérouler est un enjeu scientifique majeur. Mais il n'est nullement urgent d'envoyer des humains pour conduire cette exploration, tant il reste à faire avec des robots. En plus, il sera très difficile – et donc coûteux – de poser à la surface de Mars les lourdes charges nécessaires à la construction d'une base, même modeste. L'atmosphère y est trop ténue pour freiner correctement avec un parachute, comme sur Terre, et trop épaisse pour arriver à pleine vitesse jusqu'à la surface (les frottements produiraient des échauffements qui détruiraient l'appareil) et décélérer avec de simples rétrofusées, comme sur la Lune.

En revanche, il pourrait être intéressant d'envoyer des humains en orbite autour de la planète rouge. Cela économiserait l'infrastructure au sol pour organiser la survie de l'équipage tout en permettant de piloter en temps réel ou presque des robots perfectionnés déposés sur la planète (les signaux radio émis de la Terre mettent 5 à 22 minutes pour atteindre Mars). Et de plus, les astronautes pourraient facilement aller se poser sur les petites lunes Phobos ou Deimos, dont la très faible gravité facilite l'accès.

Finalement, *Seul sur Mars* montre en creux que les vols habités vers Mars sont d'abord une volonté politique. Et aucune autre raison, certainement pas l'exploration scientifique de Mars, ne peut justifier les budgets qu'ils exigent. ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Un jardin qui coule de source

L'art du jardin oriental, de l'Alhambra au Taj Mahal, s'expose à l'Institut du monde arabe, à Paris. On y découvre l'ingéniosité mise en œuvre pour maîtriser l'eau et l'influence toujours actuelle d'un modèle de jardin persan apparu il y a plus de 2 500 ans.

Loïc MANGIN

En cette chaleur estivale, nous sommes tous à la recherche d'un peu de fraîcheur. Les solutions sont nombreuses : plonger dans la piscine ou la mer, s'approcher d'un ventilateur à pleine puissance, se gaver de glaces... Une autre a prouvé son efficacité depuis des millénaires, c'est de déambuler dans un jardin. L'art d'aménager ces espaces verts a atteint un haut degré de raffinement et d'ingéniosité dans le monde arabe. Une exposition offre l'occasion de s'en rendre compte. Pour mieux échapper à l'ardeur du Soleil, la gestion de l'eau sera ici notre guide.

Depuis l'apparition de l'agriculture, il y a quelque 10 000 ans dans le Croissant fertile, l'un des principaux défis a été de dompter l'eau, souvent rare dans les contrées du monde arabe. Les oasis sont longtemps restées les seuls systèmes où plantes et eau cohabitaient en harmonie.

Puis on entreprit de maîtriser le cours des fleuves tels que le Nil, le Tigre et l'Euphrate grâce à de grands ouvrages (ponts, aqueducs, canaux, barrages, digues...). Ces travaux d'envergure ont amélioré l'agriculture et accompagné la sédentarisation, puis la croissance démographique dans les grandes villes. Enfin, on vit apparaître les premiers jardins d'agrément dans l'Égypte des pharaons.

Au cours de cette histoire, de nombreux dispositifs hydrauliques ont été mis au point. Citons la machine à godets actionnée par des animaux, la noria (une grande roue mue par le courant d'une rivière et qui hisse l'eau en haut d'un aqueduc) et le chadouf. Cet appareil à bascule aide à remonter l'eau d'un point d'eau, une rivière ou un puits. Il est utilisé depuis le IIIe millénaire avant notre ère et existe toujours, en Égypte notamment. On le retrouve dans plusieurs toiles françaises, par exemple chez Eugène Fromentin et Louis Hippolyte Mouchot au XIXe siècle.

Les Perses ont excellé dans l'art du jardin et ont créé un modèle en quatre parties toujours en vigueur aujourd'hui. L'histoire débute lorsque le roi Cyrus, fondateur de l'empire achéménide au VIe siècle avant notre ère, fait construire dans sa cité de Pasargades un immense jardin de 100 hectares. Dans la région, l'eau abonde (fonte des neiges, pluies saisonnières...), mais est irrégulière. Le problème est donc d'assurer un approvisionnement constant.

Le modèle du jardin persan est perceptible dans les jardins italiens de la Renaissance, dans ceux des urbanistes du début du XXe siècle...

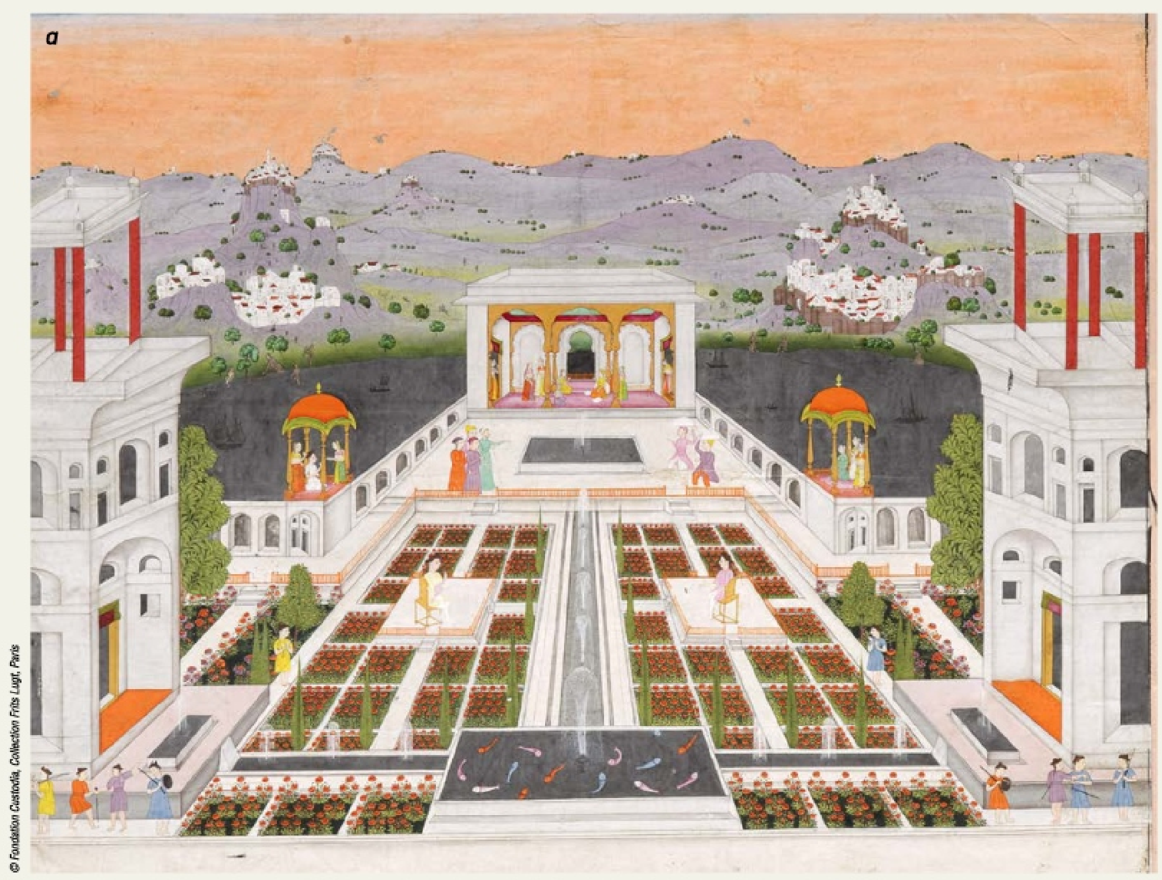
Il a été résolu par d'imposants travaux d'adduction, ainsi que l'édification de barrages et de systèmes de régulation du débit au fonctionnement encore inconnu. Le jardin qui en résulte est organisé autour d'un grand bassin qui fait office de réservoir se déversant *via* des vannes dans un grand canal transverse. Ce dernier croise perpendiculairement une grande allée. C'est la naissance du jardin classique persan Chahâr-bâgh (soit « Quatre jardins »).

Le modèle est devenu la référence du jardin oriental. On le retrouve vingt siècles plus tard en Inde, où il a été introduit par Bâbur (1483-1530), fondateur de la dynastie des Moghols (1526-1857). Le dessin original subit quelques variations, mais la structure principale reste identique au modèle persan *(ci-contre, a)*. Les descendants de Bâbur suivent l'exemple et l'appliquent avec un raffinement inégalé pour leurs mausolées, situés au centre d'un jardin évoquant le paradis. Le Taj Mahal en est l'illustration emblématique.

On repère l'influence du Chahâr-bâgh dans les jardins italiens de la Renaissance, puis dans ceux des urbanistes du début du XXe siècle. Plus récemment encore, des parcs édifiés à Beyrouth et au Caire se réclament de cet héritage. Le jardin et l'eau sont également au centre des préoccupations d'artistes contemporains, telle l'Émiratie Lateefa bint Maktoum *(c)*. Et l'on trouve un hommage au Chahâr-bâgh au pied de l'Institut du monde arabe dans le jardin éphémère associé à l'exposition. Là, des parterres suspendus, référence à Babylone, constituent une anamorphose *(b)* en forme de zellige, un motif typique du monde arabe.

À l'heure de la lutte contre le réchauffement climatique et de la volonté de faire de Paris une ville plus végétalisée, les jardins d'Orient sont une source d'inspiration... rafraîchissante. ■

Jardins d'Orient. De l'Alhambra au Taj Mahal,
du 19 avril au 30 septembre 2016
à l'Institut du monde arabe, à Paris.


a

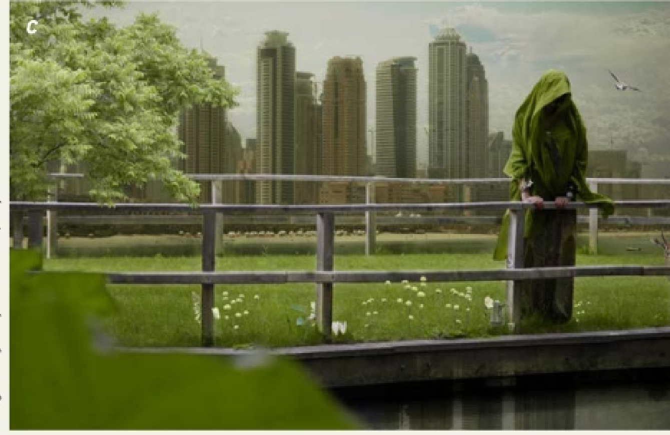
© Fondation Custodia, Collection Frits Lugt, Paris

Un jardin de l'Inde Moghole (ici, à Hyderabad, au-dessus d'un lac et face à un paysage de collines) est construit selon le modèle persan mis au point près de vingt siècles plus tôt. Il est découpé en quatre parties par des canaux rectilignes alimentés par un bassin.


b

© Thierry Rambaud

L'anamorphose qui transforme des jardins suspendus en motif octogonal.


c

© Image courtesy of Barjeel Art Foundation, Sharjah

Reflecting, de Lateefa bint Maktoum, pour réfléchir sur notre rapport aux jardins en ces temps d'urbanisation intensive.

IDÉES DE PHYSIQUE

Dompter la vague avec une planche

La pratique du surf s'apparente à celle du snowboard, mais avec une différence notable : la piste est en perpétuel mouvement !

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

« Et tout à coup, là-bas, d'une énorme vague qui jaillit vers le ciel [...], un homme à tête noire surgit au-dessus d'une crête neigeuse [...], il vole à travers les airs, aussi vite que la houle qui le porte [...]. Du fond de la mer, il a bondi sur le dos d'une lame rugissante sur laquelle il s'accroche, malgré les efforts de celle-ci pour se débarrasser de lui. » En quelques phrases, Jack London saisit bien notre fascination pour le surf. Et pour mieux apprécier les performances de ces sportifs, tentons de comprendre comment ils jouent si habilement avec les vagues.

La première difficulté à laquelle est confronté une surfeuse ou un surfeur est d'« attraper » la vague. Celle-ci s'apparente en effet à une *ola* : une onde qui se propage de proche en proche, mais qui ne transporte pas de matière.

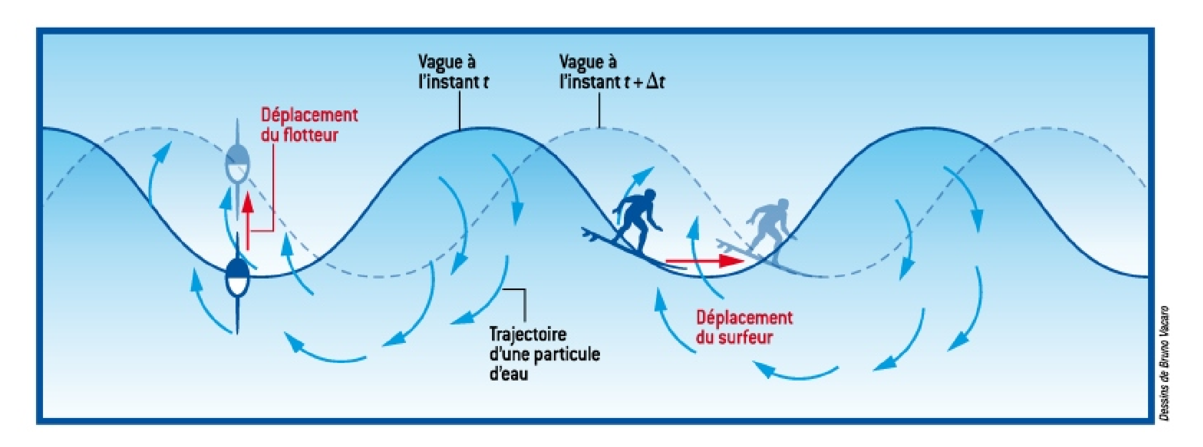
Attraper la vague

Observons en effet le mouvement d'un flotteur ou d'un nageur immobile qui se trouve sur le chemin d'une vague se propageant de gauche à droite vers le rivage. Il commence par avancer vers la droite lorsqu'il prend la crête de la vague, mais recule vers la gauche lorsqu'il se retrouve dans le creux : pour l'essentiel, il fait du surplace. L'onde ne l'emporte pas dans son mouvement.

Et inutile d'attendre les vagues successives : pour se déplacer, la seule solution dont dispose le surfeur est de ramer ! C'est pourquoi on voit les surfeurs s'éloigner de la côte et attendre, allongés sur leur planche, en guettant les vagues qui arrivent. Lorsque le surfeur juge prometteuse une vague, tout devient une question de *tempo*. Il rame rapidement avec ses bras afin que, lorsque le sommet de la vague l'atteint, il ait acquis une vitesse égale à la vitesse de propagation de l'onde.

Quelle est cette vitesse de propagation, que l'on notera c ? Une règle empirique en donne une estimation au moment où la vague se brise et dans le cas où la pente du fond

UN FLOTTEUR INITIALEMENT IMMOBILE effectue un mouvement de va-et-vient vertical à l'arrivée d'une vague ou d'un train de vagues. Un surfeur, lui, fait en sorte d'acquérir une vitesse *(ici vers la droite)* égale à la vitesse de propagation de l'onde. Il reste ainsi dans la même position relativement à la vague.



LES AUTEURS




Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

marin est douce : $c = \sqrt{1{,}3\,gH}$, où g est l'accélération de la pesanteur et H la hauteur de la vague avant qu'elle ne déferle. Pour une vague de 1 mètre (pour surfeurs débutants...), on obtient 13 kilomètres par heure (km/h). Et le triple, soit 39 km/h, pour une vague de 9 mètres, digne du spot de Jaws à Hawaii – on comprend alors que certains surfeurs se fassent tracter au bon endroit par un scooter des mers !

Gagner de la vitesse

Voilà notre surfeur au sommet de la vague prête à déferler. Comment peut-il gagner encore de la vitesse pour avoir les meilleures sensations de glisse ? Il lui suffit de dévaler la pente d'eau et de convertir son énergie potentielle de gravité en énergie cinétique. Avec un gain d'énergie de mgH, le surfeur atteint alors une vitesse égale à $v = \sqrt{3{,}3\,gH}$, soit 20,5 km/h pour une vague haute de 1 mètre.

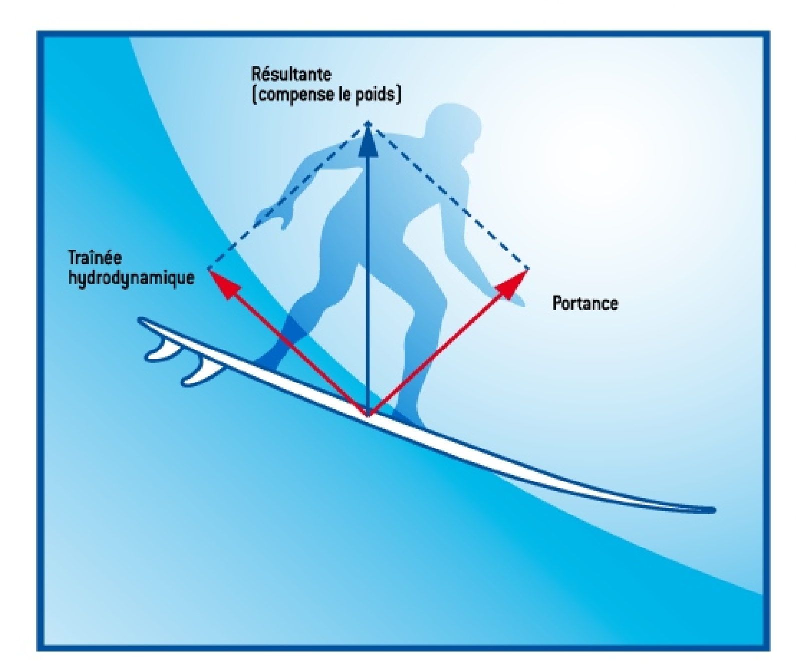
Toute l'astuce consiste à ne pas trop descendre dans la direction perpendiculaire à la vague : sinon, on dépasserait la vitesse de l'onde et l'on précéderait la vague. On peut se laisser glisser de biais, comme au monoski, pour gagner de la vitesse parallèlement à la crête de la vague tout en conservant une vitesse perpendiculaire égale à la vitesse de l'onde.

La vitesse totale du surfeur étant, au bas de la vague, $\sqrt{3{,}3\,gH}$ et sa composante en direction de la plage devant être égale à c, l'angle à donner à la trajectoire par rapport à la ligne de crête est fixé : environ 40 degrés. Dans cette situation, la vitesse de glisse du sportif parallèlement à la vague est égale à $\sqrt{2\,gH}$, soit 16 km/h pour la vague haute de 1 mètre.

Peut-on mieux faire encore, si l'on fait abstraction de toutes les dissipations d'énergie ? Les amateurs de surf qui pratiquent la technique dite du pompage savent que oui. Cette technique revient à tirer son énergie de la vague. En quoi consiste-t-elle ?

Au niveau du surfeur, la vitesse de l'eau (à distinguer de celle de l'onde) qui le porte est pour l'essentiel verticale. Autrement dit, comme un skieur, le surfeur dévale un plan incliné, mais ce dernier est animé d'un mouvement ascendant ! Par conséquent, s'il réduit sa vitesse de chute, par exemple en diminuant l'angle de sa trajectoire, le surfeur remonte vers la crête. Il gagne une énergie potentielle de pesanteur qu'il peut ensuite reconvertir en énergie cinétique en glissant plus ou moins de biais, et ainsi de suite – un bon moyen de gagner de la vitesse puis de la maintenir.

Glisser vite et durablement ne suffit pas, il faut avant tout flotter. Comment le poids du surfeur et de son équipement est-il compensé ? Bien sûr, on profite de la poussée d'Archimède grâce au matériau de la planche, moins dense que l'eau – par exemple du polystyrène à 30 kilogrammes par mètre cube. Ainsi, pour une planche longue de 2 mètres, large de 50 centimètres et épaisse de 6 centimètres, son volume d'une soixantaine de litres lui permet de soutenir une personne de 50 kilogrammes.



LES PRINCIPALES FORCES auxquelles est soumis le surfeur sont d'une part la portance hydrodynamique et la poussée d'Archimède, perpendiculaires à la surface de l'eau, d'autre part la traînée hydrodynamique, parallèle à cette surface. La résultante de ces forces compense le poids du surfeur et de son équipement, en régime stationnaire.





LA GLISSE D'UN SURFEUR parallèlement à la vague est analogue à celle, de travers, d'un skieur ou d'un pratiquant du snowboard sur une pente enneigée. Sauf que dans le premiers cas, la pente est animée d'un mouvement ascendant… Pour ne pas dériver latéralement, les deux types de sportifs jouent sur l'inclinaison de leur planche.

Ce n'est pas assez pour un adulte pas trop fluet… Ce dernier doit mettre à profit la force de portance hydrodynamique s'exerçant sur la planche, analogue à la portance aérodynamique qui soulève une aile d'avion. La portance hydrodynamique croît avec la vitesse par rapport à l'eau, si bien qu'elle devient prépondérante par rapport à la poussée d'Archimède pour des vitesses supérieures à 10 km/h. Comme un catamaran, la planche sort alors de l'eau.

Cruciale portance

Les amateurs de sensations fortes peuvent ainsi privilégier les planches courtes, donc moins volumineuses, mais à condition de gagner assez de vitesse avant de se mettre debout. En revanche, comme avec une aile d'avion, il sera en outre nécessaire de jouer sur l'angle d'attaque de la planche par rapport à la surface de l'eau pour garantir une portance suffisante.

Que devient cette portance lorsque le surfeur est sur la pente ? Commençons par le cas où le surfeur glisse dos à la vague. La portance, perpendiculaire à la surface de l'eau, a une composante horizontale orientée dans la direction de propagation de la vague. C'est donc elle qui (comme au ski) joue le rôle de force motrice vers l'avant. Si le surfeur peut néanmoins être immobile par rapport à la vague et garder la même position, c'est que cette force est compensée par la composante horizontale de la traînée, c'est-à-dire le frottement hydrodynamique de la planche sur l'eau, une force parallèle à la surface.

Pour une vitesse donnée, la force motrice varie avec la position du surfeur, en raison de la courbure de la vague. Dans la partie concave, si le surfeur est plus rapide que l'onde, il descend plus bas, dans une zone moins pentue où la force motrice diminue tandis que la part de la traînée augmente : il ralentira et sera rattrapé par l'onde. Si, au contraire, il est plus lent, il gagnera une zone de pente plus raide et accélérera pour reprendre de la vitesse. La partie concave de la vague permet donc une avancée stable. Ce n'est pas le cas dans la partie convexe de la vague, où l'effet est inversé.

Quand le surfeur avance le long de la vague, la difficulté est de ne pas glisser latéralement. Pour un skieur ou un pratiquant de snowboard, c'est possible grâce aux carres de la planche, c'est-à-dire ses bords, qui sont aiguisées pour accrocher sur la pente et déraper le moins possible sur le côté. Pour le surfeur, il en est de même : celui-ci va incliner la planche sur le côté par rapport à la surface pour mordre l'eau et, selon l'état de la tranche de la planche, plus ou moins mince et plus ou moins arrondie, il va accrocher la vague.

Les planches en bois que chevauchent les Polynésiens depuis des centaines d'années n'offrent que ce moyen pour accrocher la vague. Les planches plus modernes ont des ailerons à l'arrière. Ils jouent le rôle de dérives et facilitent le contrôle de trajectoire. Il n'en demeure pas moins que l'art du surfeur réside toujours dans le choix d'une bonne orientation et d'une bonne inclinaison de sa planche. ■

■ **BIBLIOGRAPHIE**

R. Edge, **Surf physics**, *The Physics Teacher*, vol. 39(5), pp. 272-277, 2001.

M. Paine, **Hydrodynamics of surfboards**, mémoire de fin d'études, université de Sydney, 1974 (www.mpainesyd.com/filechute/paine_surf_thesis1974.pdf).

T. Hendricks, **Surfboard hydrodynamics**, série d'articles publiés dans *Surfer Magazine*, 1969 (www.rodndtube.com/surf/info/Hydrodynamics.shtml).



QUESTION AUX EXPERTS

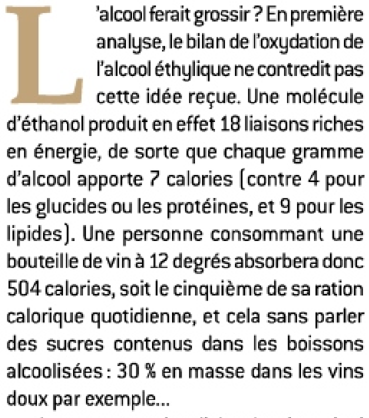
Boire de l'alcool fait-il grossir ?

L'éthanol est très calorique, mais son métabolisme particulier limite en réalité ses effets dans la prise de poids.

Bernard SCHMITT



© Shutterstock.com/ Mauro Pezzotta



L'alcool ferait grossir ? En première analyse, le bilan de l'oxydation de l'alcool éthylique ne contredit pas cette idée reçue. Une molécule d'éthanol produit en effet 18 liaisons riches en énergie, de sorte que chaque gramme d'alcool apporte 7 calories (contre 4 pour les glucides ou les protéines, et 9 pour les lipides). Une personne consommant une bouteille de vin à 12 degrés absorbera donc 504 calories, soit le cinquième de sa ration calorique quotidienne, et cela sans parler des sucres contenus dans les boissons alcoolisées : 30 % en masse dans les vins doux par exemple...

La consommation d'alcool majore ainsi l'apport calorique total quotidien, ce qui *a priori* devrait se traduire par un surpoids. Or c'est plutôt l'inverse que l'on observe habituellement : les grands consommateurs d'alcool ne sont pas plus gros que les abstinents, et ont même un indice de masse corporelle (IMC) légèrement inférieur à la moyenne.

On a tenté d'expliquer ce paradoxe par l'idée que les grands buveurs mangeraient moins. Une idée fausse, ont montré des enquêtes épidémiologiques. De plus, les gros buveurs souffrent souvent de troubles anxiodépressifs qui les poussent à manger pour se rassurer. Ils devraient donc être plus gros et avoir un IMC plus élevé. Or ce n'est pas le cas.

Pour les nutritionnistes, la clé de ce paradoxe est plutôt liée au métabolisme particulier de l'alcool, que le corps ne stocke pas mais transforme par deux voies enzymatiques principales, qui se déroulent essentiellement dans les cellules du foie.

La première voie est celle de l'ADH (alcool-déshydrogénase hépatique), prépondérante chez les buveurs modérés. Elle comprend deux oxydations successives : l'éthanol est d'abord hydrolysé en acétaldéhyde, très toxique, qui est ensuite oxydé en acétate (ou acide acétique). La première oxydation nécessite une coenzyme notée NAD, qui acquiert un atome d'hydrogène et devient du NADH. La seconde oxydation est effectuée par l'enzyme ALDH (aldéhyde déshydrogénase) en présence de l'ion NAD^+.

Des calories non stockées

L'acide acétique produit par cette voie se lie à une molécule nommée coenzyme A, ce qui donne l'acétyl-CoA. Ce dernier pénètre dans les mitochondries des cellules comme substrat du cycle de Krebs (la voie métabolique qui fournit à la cellule son énergie, sous la forme de molécules d'ATP). Couplées à la chaîne respiratoire mitochondriale, la réoxydation du NADH et celle des coenzymes issues du cycle de Krebs produisent 18 liaisons riches en énergie sous forme d'ATP.

Tant que l'enzyme NAD^+ est en concentration suffisante, il n'existe pas de limitation à la captation et à l'oxydation de l'alcool éthylique par les cellules du foie. Il s'ensuit que le rapport des concentrations $[NADH]/[NAD^+]$ augmente très vite. Cela a pour conséquence de perturber les autres voies métaboliques, notamment glucidiques et lipidiques. Si l'on fait un bilan énergétique, une petite dose d'alcool (chez les buveurs très modérés) contribue (de façon négligeable) au métabolisme général. Au-delà, c'est en pure perte sur le plan de l'énergie stockable.

La seconde voie enzymatique de l'hydrolyse de l'alcool est le MEOS *(microsomal ethanol oxidizing system)*, un système de dégradation de l'éthanol dans le foie qui se met en marche lorsque sa concentration dépasse les possibilités d'oxydation par l'ADH et la chaîne respiratoire mitochondriale. Cette voie est donc d'autant plus importante que la personne boit régulièrement et avec excès. Elle fait intervenir une enzyme, le CYP2E1, capable d'oxyder l'éthanol en acétaldéhyde et, en même temps, de transformer une molécule de NADPH en $NADP^+$. Cela a pour conséquence de produire de l'énergie sous forme de chaleur, et non sous forme stockable. C'est pourquoi les calories apportées par l'alcool sont considérées comme peu utiles, étant exclues du bilan énergétique global.

Que conclure ? Non, l'alcool ne fait pas grossir, d'autant plus que sa consommation régulière entraîne une dénutrition par baisse de la glutathion peroxydase, du sélénium, de la vitamine E, du calcium, du fer, des folates, du zinc et des vitamines A, C, B1, B6, B12 et PP. Rien que ça ! ■

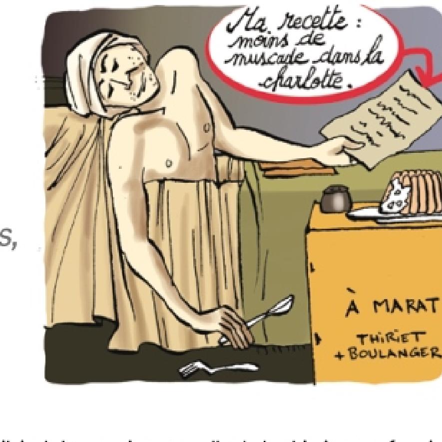
Bernard SCHMITT est médecin et chercheur au CERNh (Centre d'enseignement et de recherche en nutrition humaine), à Lorient.

SCIENCE & GASTRONOMIE

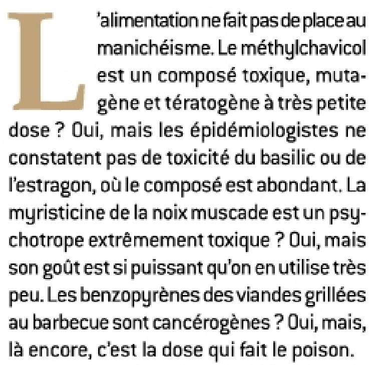
Toxique, le pain complet ?

Certaines des substances contenues dans les aliments, considérées comme néfastes, ont parfois des vertus. C'est le cas de l'acide phytique.

Hervé THIS



© Jean-Michel Thiriet



L'alimentation ne fait pas de place au manichéisme. Le méthylchavicol est un composé toxique, mutagène et tératogène à très petite dose ? Oui, mais les épidémiologistes ne constatent pas de toxicité du basilic ou de l'estragon, où le composé est abondant. La myristicine de la noix muscade est un psychotrope extrêmement toxique ? Oui, mais son goût est si puissant qu'on en utilise très peu. Les benzopyrènes des viandes grillées au barbecue sont cancérogènes ? Oui, mais, là encore, c'est la dose qui fait le poison.

Pour des générations de spécialistes en science et technologie des aliments, l'acide phytique était un facteur antinutritionnel néfaste. Or on découvre aujourd'hui qu'il a de nombreux effets physiologiques bénéfiques (Elisângela Silva et Ana Paula Bracarense, *Journal of Food Science*, vol. 81(6), pp. R1357-R1362, 2016).

Présent dans l'enveloppe de nombreuses graines de céréales ou légumineuses, l'acide phytique était déconsidéré depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'utilisation de farines complètes (où il est concentré) ayant conduit à des pains responsables de malnutrition. La raison vient de la constitution des molécules d'acide phytique. Elles comportent un sucre, l'inositol, ceint de six groupes phosphate, chargés négativement, qui se lient à des ions positifs, tels ceux de zinc, cuivre, cobalt, manganèse, fer, calcium. Les ions importants de nos aliments sont alors insolubilisés et non assimilés par l'organisme : les gros mangeurs de pains à base de farines complètes sont ainsi déminéralisés.

L'acide phytique est-il alors un vilain de la nutrition ? Pas tout à fait. D'une part, il a une action bénéfique par la fixation de molécules malsaines. D'autre part, notre description de la fixation des minéraux est simpliste, car elle néglige l'action d'acides organiques, tel l'acide ascorbique (vitamine C), qui favorisent l'assimilation des minéraux.

En outre, la découverte de récepteurs cellulaires de l'acide phytique ou des protéines liant spécifiquement les polyphosphates d'inositol, au début des années 2000, a montré que l'acide phytique est important pour des processus physiologiques variés, tels que la maturation des ovocytes, la division et la différenciation cellulaires, le transport des ARN du noyau vers le cytoplasme ou la réparation de l'ADN !

Ces actions expliquent les effets positifs de l'acide phytique contre certains cancers : du pancréas, de la prostate, du col utérin, du colon, du sein, de la peau. De même, on a observé des effets protecteurs de l'acide phytique contre d'autres affections, en raison de la liaison au fer ou au calcium. L'acide phytique se lie aussi aux radicaux libres et il inhibe ainsi la peroxydation des lipides, jusque dans les situations *in vivo* (dans le colon de rats). On n'en finit pas d'énumérer les réactions où l'acide phytique est biologiquement utile : modulation du système immunitaire, modulation de l'apoptose (mort cellulaire programmée)...

Hors de l'organisme, dans les aliments, on découvre d'autres actions bénéfiques, notamment contre les mycotoxines – ces dangereux contaminants des aliments, notamment des céréales, dus à des champignons microscopiques qui se développent et que la crainte actuelle de la chimie peut favoriser (les aliments non traités risquent plus d'être contaminés). En 2009, il est apparu que l'ajout d'acide phytique à l'alimentation de rats réduisait notablement des troubles histologiques et reproducteurs dus à des mycotoxines. En 2012, on a observé que l'acide phytique protège la membrane cytoplasmique des cellules intestinales contre les effets délétères d'une des mycotoxines les plus répandues.

Enfin, l'acide phytique a des effets antioxydants : il réduit le brunissement du jus de pommes ; la viande de porc traitée à l'acide phytique se conserve plus longtemps ; la couleur, l'odeur et diverses autres propriétés des produits carnés (viande, jambon, saucisses) sont préservées, sans doute en raison d'actions antirancissement.

Ces connaissances amènent des progrès pour les amateurs de pain complet : une longue fermentation par les levures s'impose, car l'acidité résultante, en plus de sa saveur agréable, active des enzymes phytases, qui dégradent l'acide phytique en inositol et en ions phosphate libres. La coupable déminéralisation est évitée. Hosanna ! ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

■ POLITIQUE DE RECHERCHE

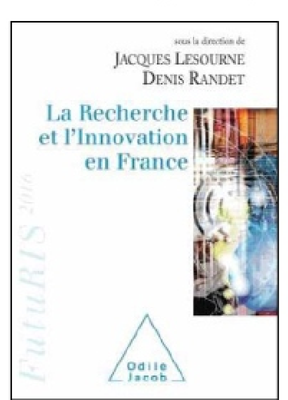
La Recherche et l'Innovation en France

J. Lesourne et D. Randet
Odile Jacob, 2016
(368 pages, 27,90 euros).

En France, le monde de la recherche, qu'elle soit publique ou privée, est composé d'une multitude d'acteurs aux objectifs, moyens, financements, réseaux, partenariats et coopérations souvent mal identifiés. Ce « désordre institutionnel » empêche de nombreux laboratoires d'accéder au très haut niveau de qualité rendu indispensable par la mondialisation de l'innovation et son caractère de plus en plus concurrentiel.

Cet ouvrage, coordonné par un professeur au Cnam et par un ancien délégué général de l'Association nationale de la recherche et de la technologie, fait le point sur l'organisation actuelle de la recherche en France et en Europe. Son objectif est de stimuler le renouvellement des conceptions qui président à cette organisation et de promouvoir l'évolution des institutions pour une meilleure adaptation aux réalités contemporaines.

Quelques exemples sont développés : stratégies territoriales, création du grand campus universitaire de Paris-Saclay, création de nombreux « *open labs* », partenariats public-privé, intégration de doctorants dans la R&D de grandes entreprises, renforcement des capacités stratégiques des universités. Chaque cas est analysé au prisme des synergies, des avantages et des résultats attendus.



Par ailleurs, cet ouvrage est aussi le dixième opus de l'édition annuelle des travaux de la plateforme FutuRIS-ANRT. Il a le mérite de proposer aux chercheurs, mais aussi aux décideurs économiques et politiques pour qui le monde de la recherche reste une jungle impénétrable, un fil conducteur très complet permettant assurément de gagner en compréhension et, ainsi, en efficacité dans ses rapports avec les chercheurs.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

■ PHYSIQUE

Le Règne du temps

Émile Biémont
Académie royale de Belgique, 2016
(368 pages, 20 euros).

Le temps, qu'est-ce ? « Si personne ne me le demande, je le sais bien. Si je veux l'expliquer à quelqu'un qui le demande, je l'ignore », répond saint Augustin. Le scientifique actuel, lui, répond simplement : « C'est ce que je mesure à l'aide d'une horloge », et ce livre est un très bon moyen d'apprendre l'essentiel de cette quête de la mesure du temps.

Ainsi, on y lira que les premières mesures du temps étaient fondées sur l'observation de phénomènes naturels : le jour, le mois et l'année. Pour s'affranchir de l'observation peu aisée de ces phénomènes, les horloges mécaniques ont été développées au Moyen Âge. Mais ces objets artisanaux



n'atteignaient pas la précision requise pour se localiser en mer. Élaborée par Galilée, Huygens et Hooke au XVIIe siècle, la théorie scientifique de l'oscillateur permit de définir un « temps propre » : celui du pendule dans les horloges et celui du balancier-spiral dans les montres. C'est ainsi que Harrison a réalisé un « chronomètre de marine » suffisamment précis pour mesurer la longitude en mer. Parallèlement, la physique newtonienne, perfectionnée par Euler, a permis de déterminer en mer l'heure précise par observation du ciel, et par là de vérifier le bon fonctionnement des chronomètres.

La mesure du temps continue à jouer un rôle central dans la géolocalisation : les horloges atomiques sont indispensables au fonctionnement du GPS. Le temps artificiel des horloges atomiques est plus stable que le temps correspondant à la rotation de la Terre, mais c'est ce temps naturel qui a été choisi comme référence. Les horloges atomiques doivent donc être régulièrement corrigées par l'insertion de secondes intercalaires. La dernière en date est celle de 23:59:60 du 30 juin 2015. C'est un incident dans la quête de la mesure du temps que vous raconte ce livre, en somme !

Ilan Vardi
EPFL, Neuchâtel

■ ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La Comédie atomique

Yves Lenoir
La Découverte, 2016
(320 pages, 22 euros).

Pour l'auteur, militant antinucléaire et ingénieur, la communication autour du nucléaire s'inscrit irrémédiablement dans un déni systématique des effets délétères des usages de l'atome. Il remonte ici l'histoire, jusqu'à la découverte même de la radioactivité, pour dénoncer le système chargé de la radioprotection au niveau mondial.

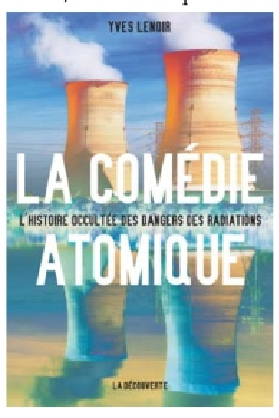
Sur la base d'une plongée dans les archives des institutions internationales (OMS, CIPR, UNSCEAR), mais aussi de certains travaux universitaires et de son expérience de terrain (en Biélorussie notamment), l'auteur retrace la manière dont se sont constituées les normes de protection et les institutions qui les produisent. Pour lui, c'est clair, elles sont ancrées dans l'idéologie d'un atome conquérant et occultent l'ampleur de ses conséquences.

Ainsi, il revient en détail sur les grands accidents nucléaires historiques et leurs traitements politique et institutionnel, lesquels donnent une large part au rassurement des populations et à leur supposée radiophobie. En cela, Yves Lenoir rappelle avec efficacité les effets délétères d'une trop grande concentration des liens entre expertise et décision, tout comme ceux d'un entre-soi des experts. Très chronologique, son livre entre parfois assez loin dans les détails techniques sur la radioactivité et le fonctionnement des réacteurs, mais le traitement clair et détaillé de ces parties les rend accessibles au lecteur.

Le style est malheureusement trop militant : les événements sont mis en scène tandis que certaines

formulations ne permettent pas de savoir s'il s'agit de faits avérés, d'interprétations ou d'allégations de l'auteur. Si elles peuvent éventuellement complaire à des lecteurs déjà convaincus par les idées de l'auteur, ces tournures en rebuteront d'autres davantage férus d'objectivité. En tant qu'antinucléaire ou climatosceptique, Yves Lenoir est un habitué des textes aux positions tranchées, et son élan… l'entraîne.

Là où un historien académique aurait sans doute mis en perspective l'émergence de l'atome au XXe siècle dans un contexte historique guerrier plein de menaces inouïes, l'auteur verse plutôt dans



une interprétation machiavélique du comportement des institutions et des personnes.

L'ouvrage présente d'indéniables points d'intérêt, tant sur le fond que dans les interprétations présentées, mais il constitue avant tout une enquête à charge contre le système international de protection radiologique. Pour partiale qu'elle soit, cette enquête n'en est pas moins digne d'intérêt, car elle rappelle à quel point il est difficile d'exercer des responsabilités au sein d'une industrie aux effets transgénérationnels.

Josquin Debaz
EHESS, Paris

■ **HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES**

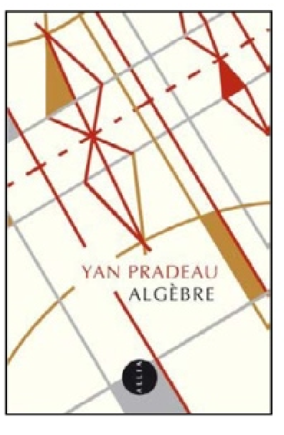
Algèbre

Yan Pradeau
Allia, 2016
(144 pages, 7,5 euros).

Court et plaisant, ce livre raconte la vie d'Alexandre Grothendieck (1928-2014), un des meilleurs mathématiciens du XXe siècle. Grothendieck a poussé l'algèbre à son abstraction maximale, mais c'est aussi un personnage de roman. Son enfance se déroule entre un père anarchiste russe, condamné à mort à 18 ans, et une mère allemande, d'extraction bourgeoise et déjà mariée. En 1936, elle le confie à un pasteur afin de rejoindre le père d'Alexandre en Espagne, puis ses parents le font venir à Paris, où il arrive le jour de l'attaque allemande ! Alexandre devient alors un « étranger indésirable », tandis que son père meurt à Auschwitz.

Protégé par son milieu scolaire, Alexandre découvre les mathématiques et, après avoir retrouvé sa mère en 1945, s'inscrit à la faculté des sciences de Montpellier. Là, un professeur reconnaît en lui un « pur joyau qu'il fallait polir » et lui accorde une bourse pour rejoindre l'ENS, où il rencontre un ensemble de jeunes normaliens ambitieux voulant refonder « la mathématique » : Bourbaki. Atypique, il est envoyé faire sa thèse avec Jean Dieudonné et Laurent Schwartz.

Pour le tester, Dieudonné et Schwartz lui communiquent quatorze problèmes sur lesquels ils buttent. Deux mois plus tard, Alexandre en a résolu sept et il les aura tous résolus au bout de trois ans. Après le deuil de sa mère en 1957, il prend son envol lors du



Congrès international de mathématiques d'Édimbourg. Son âge d'or de mathématicien s'ensuit, couronné par la médaille Fields en 1966, qu'il refuse.

En mai 1968, la vie de Grothendieck bascule. Le livre commence d'ailleurs judicieusement par cela. Alexandre se met à fréquenter les milieux écologistes radicaux, notamment les communautés du Larzac. Il arrête alors la recherche mathématique. À 40 ans.

Pourquoi le meilleur algébriste de tout temps explose-t-il à son apogée ? L'auteur, et c'est son grand talent, laisse chacun se forger une conviction sur cette énigme. Quoi qu'il en soit, Alexandre Grothendieck est un personnage fascinant. Il fait penser au personnage de Stefan Zweig dans *Le Joueur d'échecs*, ou encore au chercheur campé par Houellebecq dans *Les Particules élémentaires*. Mais il a vraiment existé, et ce livre, bien documenté et très fort malgré sa brièveté, suggère diverses pistes afin de mieux le comprendre.

Pierre Bertrand
Université de Clermont-Ferrand





Fourmis d'Europe occidentale
C. Lebas *et al.*
Delachaux & Niestlé, 2016
(416 pages, 39,90 euros).

L'objectif de ce livre est de satisfaire à la fois le naturaliste et le promeneur curieux qui souhaitent identifier une ou plusieurs des 480 espèces européennes de fourmis, croisées au jardin ou en chemin. Les espèces ou groupes d'espèces similaires sont présentées sous la forme de fiches associant photographies détaillées, aire de répartition et brève description de la biologie. Sont illustrées 230 espèces en près de 600 photographies.

Des sexes innombrables
Thierry Hoquet
Seuil, 2016
(250 pages, 18 euros).

L'espèce humaine est sexuée et dimorphique… en première approximation. Si l'on y regarde de plus près, les choses sont plus complexes et des nuances apparaissent, qui traduisent des réalités biologiques et des constructions culturelles, les secondes souvent justifiées en invoquant les premières, d'ailleurs… Lancé dans une traque aux idées reçues, l'auteur les relève et argumente inlassablement pour que l'on cesse de faire jouer à la dichotomie sexuelle un rôle social. Un point de vue fondé en science, mais qui n'en est pas moins un point de vue.



Les Confessions d'un primate
Pierre Jouventin
Belin, 2016
(270 pages, 9,90 euros).

Comment résister au plaisir de signaler la réédition en poche de ces « histoires de pingouins, de babouins et de sagouins », comme l'auteur, ancien éthologue au CNRS, les définit ? Vous y découvrirez beaucoup d'aventures vécues par l'auteur, de comportements animaux, qu'il sait à merveille comparer aux comportements humains et placer dans leur contexte évolutif, de comportements de chercheurs, qu'il analyse avec lucidité, et, finalement, de comportements de sagouins, qui sont le plus souvent… des hommes. Une excellente lecture d'été !

SORCELLERIE NUMÉRIQUE

Que la révolution numérique présente une nouveauté radicale par rapport à la révolution mécanique, voici une expérience de pensée qui l'illustre (inspirée de celle faite par Nazim Fatès dans *Lettres à Alan Turing*, J.-M. Lévy-Leblond (dir.), Thierry Marchaisse, 2016).

Imaginons que je débarque dans l'Athènes céleste, et que Pythagore me demande ce qu'il y a de neuf sur Terre depuis qu'il l'a quittée. Je pourrais, avec un mal fou, certes, mais je pourrais néanmoins lui décrire à peu près nos moteurs et nos avions, le convaincre qu'ils ne sont mus par aucune magie. Par contre, même en atteignant le sommet de l'éloquence didactique, impossible de lui expliquer qu'avec



un objet tenu dans la main, je puis voir une personne éloignée de 1 000 kilomètres et parler avec elle, écouter de la musique, lire des livres sans savoir où ils se trouvent, rafraîchir mes connaissances sur sa secte à lui, Pythagore, disparue depuis longtemps, et m'informer des derniers événements en Grèce ! Je ne crois pas à ta sorcellerie, me rétorquerait-il.

Comme aurait pu le dire un autre Grec Ancien, on ne vit pas deux fois dans le même Univers.

ALLONS ENFANTS DE LA PATRIE...

La médaille Fields et le prix Abel flattent les Français : leur nation a le génie des mathématiques. Trois fois moins peuplée que les États-Unis, elle a presque autant de lauréats. Certes, cette quasi-égalité repose



sur quelques coups de pouce, mais ils n'ont rien de bien méchant. Alexander Grothendieck est né apatride à Berlin, Jacques Tits est né en Belgique, Artur Ávila au Brésil, mais tous ont beaucoup travaillé en France et en ont pris la nationalité. Alors, leur place est en équipe de France.

Accroître encore notre palmarès serait facile. Annexons la Belgique ! Puis décrétons, avec effet rétroactif, que tout individu né sur le sol belge est français de naissance. Plus ne serait besoin de coups de pouce pour ajouter à notre gloire deux médailles Fields (Pierre Deligne, Jean Bourgain) et deux prix Abel (Jacques Tits, devenu français de souche, et encore Pierre Deligne). Quant à la propagande indispensable pour justifier une entreprise militaire, elle proclamerait que c'est le génie français qui, à l'étroit dans les frontières actuelles, déborde, fertilise la Belgique voisine et fait d'elle un grand pays mathématique !

Bien des guerres ont eu des causes plus futiles, non ?

HISTOIRES D'ÉCRITURES

Que connaître l'histoire d'une notion en facilite l'apprentissage est sûrement vrai, vu la quantité de gens qui pensent ainsi. Suggérons donc que, avant d'enseigner aux enfants à lire et à écrire, on leur raconte l'histoire de l'écriture.

À 5 ans, ils apprendront que l'écriture semble remonter au IVe millénaire avant notre ère. Elle serait née en Mésopotamie pour les besoins d'opérations comptables dans des centres urbains. Elle ne vient pas de rien : on peut considérer l'art figuratif comme une protoécriture. L'histoire du cunéiforme, sur la longue durée, sera l'occasion d'analyser l'écriture comme une technique évoluant en corrélation avec les autres. Une initiation aux hiéroglyphes égyptiens et aux signes divinatoires sur les écailles de tortues dont dérivent les caractères chinois fera sentir aux enfants toute l'inventivité humaine, et les convaincra de leur chance de vivre dans une civilisation ayant un système plus simple, l'alphabet. L'observation ludique de l'évolution de quelques lettres illustrera la généalogie menant de l'alphabet phénicien aux alphabets grec puis latin. On signalera que les alphabets hébreu et arabe descendent aussi du phénicien. Arguer de cette parenté pour résorber d'éventuelles tensions sociales ou raciales dans la classe est laissé à l'initiative de l'enseignant.

Ainsi préparés à l'arbitraire du signe, les enfants, à 6 ans, apprendront à lire et à écrire comme qui rigole.

RAISONNABLEMENT RATIONNEL

Les préjugés sont exaspérants, mais l'humanité leur doit sa merveilleuse diversité. Si les hommes n'avaient d'autres convictions que les conclusions fondées sur un examen rationnel, tous penseraient de même – à quelques nuances près de démarches, qui seraient vite réglées. Ils ne gagneraient donc rien à discuter.



Si je me crois rationnel, je ne cherche pas à discuter, mais à convaincre ; je ne modifie ma position qu'au cas où mon argumentation révèle une faille. Pour que je discute vraiment, il faut que, lucide sur moi-même, je sois conscient d'être la proie obligée de préjugés et de passions. Autrement dit, je dois être assez rationnel pour me rendre compte que je ne le suis pas. La raison m'aide à discuter si elle m'avertit qu'elle n'est pas plus avec moi qu'avec mon interlocuteur. Sinon, elle me crispe sur mes certitudes. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – août 2016 – N° d'édition M0770466-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 –
Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 210 619 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.



LE MINISTERE DE LA JUSTICE RECRUTE

www.metiers.justice.gouv.fr

SOUTENIR
LES JEUNES SOUS PROTECTION JUDICIAIRE ET LEUR FAMILLE

TRAVAILLER
AU SEIN D'UNE ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE

MENER
DES INVESTIGATIONS ET APPORTER DES ÉCLAIRAGES CLINIQUES DANS LE CADRE DE L'ACTION ÉDUCATIVE

VOUS DÉTENEZ UN DIPLÔME DE PSYCHOLOGUE ?

REJOIGNEZ LA PROTECTION JUDICIAIRE DE LA JEUNESSE

Une administration promotrice de santé